

# 基于分层 TOPSIS 法的预警机效能评估

张 毅<sup>1</sup>, 姜青山<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 预警机(early-warning aircraft, EWA)效能评估是军事指挥员进行作战部署的基础之一,通过对 EWA 效能评估研究现状的分析,提出一种采用分层逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)进行 EWA 效能评估的方法。首先,对影响 EWA 效能的指标进行分类,建立分层指标体系;其次,构建了多属性决策的分层 TOPSIS 法的数学模型,并采用熵权法确定指标权重;最后,通过对四型典型 EWA 的效能评估,表明所提方法的有效性和可行性。

**关键词:** 效能; 预警机; 指标体系; 熵权法

中图分类号: V 271.4; E 911

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2011.05.18

## Effectiveness evaluation of early-warning aircraft based on hierarchy TOPSIS

ZHANG Yi<sup>1</sup>, JIANG Qing-shan<sup>2</sup>

(1. Graduate Student's Brigade of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Command Department of Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Effectiveness evaluation of EWA is one of foundations that the military conductor carries on battle deployment. After analysing the research of status quo, a hierarchy technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) is put forward to evaluate the effectiveness of EWA. Firstly, the index which affects the effectiveness of EWA is classified and the hierarchy index system is established. Secondly, the multiple attribution decision making mathematics model of the hierarchy TOPSIS is set up and the entropy power process is adopted to solve index power coefficient. Finally, a typical example indicates that the method is effective and feasible.

**Keywords:** effectiveness; early-warning aircraft (EWA); index system; entropy power process

## 0 引言

预警机(early-warning aircraft, EWA)是一种作战支援飞机,装有远距搜索雷达和数据处理、敌我识别、通信导航、指挥控制、电子对抗等设备,集预警、指挥、控制、通信和情报于一体,用于搜索、监视及跟踪空中和海上目标并指挥、引导己方飞机遂行作战任务,起到活动雷达站与空中指挥中心的作用。文献[1]建立了基于概率的 EWA 系统可用度、可信度、能力和效能的解析计算模型,分析和探讨了 EWA 执行防空预警和拦截引导任务的能力;文献[2]采用系统有效性分析方法给出了基于防空预警使命的 EWA 效能计算方法。

EWA 效能评估的指标有很多,在众多的指标中进行合理选择并对 EWA 效能进行优劣排序,是多属性决策(multiple attribution decision making, MADM)问题。MADM 是决策领域的重要研究内容<sup>[3-4]</sup>,在工程、管理、军事等领域均有广泛的应用。MADM 问题已有很多求解方法,如在给定信息的情况下考虑权重的设定及方案的排序<sup>[5-8]</sup>。当指标较多时,往往带来指标权重难以分配的问题,或者即使对

各指标进行了权重分配,也会带来指标权重差异过小的情形。本文运用分层思想对 EWA 效能评估的指标体系加以分类,建立递阶层次结构,并用熵权法<sup>[9]</sup>确定指标权重,结合逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法,对 EWA 效能进行优劣排序,给出一种 EWA 效能评估的定量比较方法。

## 1 EWA 效能评估指标的确定

武器装备的效能通常是指该武器装备完成预定作战任务能力的大小<sup>[10-13]</sup>。效能指标是效能评估的度量尺度,通常效能评估的指标体系可用性能指标、比例指标、概率指标、模糊指标、综合指标等来判别武器系统的优劣。EWA 系统通常包括载机系统和任务电子系统<sup>[14]</sup>,任务电子系统分为三类:探测引导系统、通信传输系统和自卫电子战系统。

### 1.1 载机性能指标的确定

载机的续航时间越长,EWA 在任务岗位上的停留时间越长,从而保持了监视和控制的连续性,也减少了轮换替班 EWA 的数量。最大起飞重量关系到任务电子系统的规模

和机上人员工作环境的舒适性。按照 EWA 系统的任务功能, 载机从基地出航时应具有较高的飞行速度, 受到威胁时应能及时规避, 同时, 出、返航速度, 应与护航战斗机的速度相当, 以便于护航编队。因此, 选取与载机性能相关的三个指标: 最大续航时间、最大起飞重量和最大飞行速度。

### 1.2 探测引导性能指标的确定

EWA 的监视雷达是系统的最主要传感器, EWA 系统的各项功能绝大部分依靠雷达提供的信息来完成。雷达探测距离越远, EWA 提供的预警时间也越长, 雷达最大探测距离由载机在特定高度和工作方式下探测典型目标的最大距离来确定。

从 EWA 的主要功能看, 雷达搜索总方位角应要求全方位 360°。首先, 从警戒功能看, 全方位搜索才可能对敌多架次全方位入侵时不遗漏目标; 其次, 从引导任务看, 敌方目标来袭方向与我方拦截机出动方向不同, 很可能相差 180°, 因此 EWA 雷达不能像战斗机雷达那样只照射前半球。

EWA 雷达主要采用动目标检测技术、脉冲多普勒技术或相控阵技术等。雷达体制指标的取值可以根据雷达采用的不同技术进行适当取值, 取值范围可在 0.6~1。

最大引导批次与 EWA 设置的操纵台数量和引导方式有关。一般而言, 精确引导时每一操纵台人工引导最多 1~2 批次, 有空中自动数据交联能力可引导 10~15 批次。当采用概略引导或广播引导方式时, 引导批次要相应增加。

雷达抗干扰能力包括两个方面: 一是雷达本身的发射功率强度与分辨力水平; 二是雷达具备的抗干扰技术措施。抗干扰技术主要有超低旁瓣技术、捷变频技术、重频跳变技术等。根据预警雷达的特点, 抗干扰能力取值范围可在 0.6~1。

电子侦察(electronic surveillance measurement, ESM)是对目标雷达信号的被动接收并据此对辐射源进行定位或威胁告警; 通信侦察(communication surveillance measurement, CSM)主要用于截获敌方空-空与空-地通信。可据此判断敌方的战术意图。各国对 ESM 和 CSM 设备及能力的信息一般保密, 往往只能参考该 EWA 生产国或使用方电子战水平来估计。

因此, 选取与探测引导能力指标相关的 6 个指标: 雷达最大探测距离、雷达搜索总方位角、雷达体制、最大引导批次、雷达抗干扰能力和 ESM、CSM 能力。

### 1.3 通信传输性能指标的确定

通信传输系统用于 EWA 任务电子系统及其操纵人员与外界传输信息, 并提供操纵人员之间的内部通信。通信传输性能可用总通信道、数据交联水平和通信抗干扰能力三个指标加以衡量。数据交联水平的取值: 普通数据交联(如机内通话、V/UHF 电台、HF 电台等)取 0.5, 在此基础上有卫星通信加 0.2, 在以上两者基础上如果有特殊通信设备(如联合战术信息分配系统、微波猝发通信等), 再加上相应数值, 但总数不超过 1。通信抗干扰能力主要采用跳频技术、直接扩频技术、猝发通信技术、自适应干扰滤波技术等, 可根据相应技术进行适当取值。

### 1.4 自卫电子战能力指标的确定

在 EWA 尚无积极自卫手段的情况下, 自卫电子战能力显得尤为重要。自卫电子战能力可用综合威胁告警能力和电子对抗能力两个指标加以衡量。综合威胁告警手段主要有: 雷达告警系统、激光告警系统和导弹接近告警系统。

综合威胁告警能力的取值为: 有雷达告警系统的取值为 0.6, 有雷达和激光告警系统取值 0.8, 三者兼有的取值 1。自卫电子对抗手段主要有: 投射箔条弹与红外火焰弹以及有源干扰系统。电子对抗能力取值为: 有箔条弹的取 0.7, 有箔条弹和红外火焰弹的取 0.9, 三者兼有的取 1。

综合以上分析可得 EWA 效能评估的指标体系如图 1 所示。

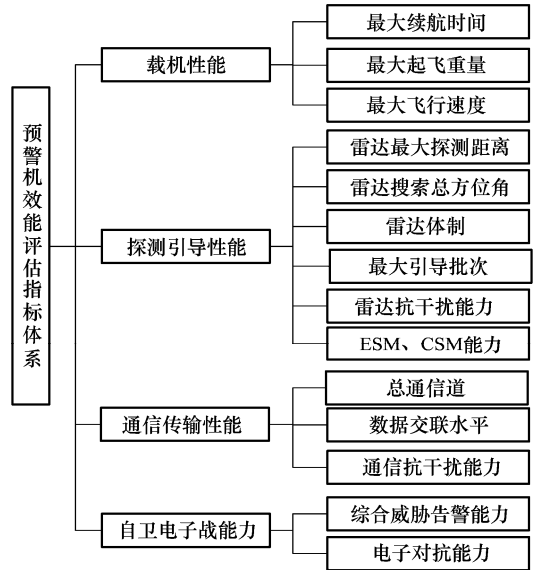


图 1 EWA 效能评估的指标体系

## 2 数学模型的建立

### 2.1 MADM 数学模型的建立

令  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 。对于 MADM 问题, 设决策方案集为  $U = \{u_i\}$ , 属性集为  $V = \{v_j\}$ , 指标权重集为  $W = \{\omega_j\}$ , 决策矩阵为  $A = (a_{ij})_{m \times n} (i \in M, j \in N)$ ,  $a_{ij}$  为方案  $u_i$  按指标  $v_j$  进行测度所得到的值,  $\omega_j$  为待确定的指标权重, 且有  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ , 则四元组  $\{U, V, W, A\}$  就构成了 MADM 的数学模型。

属性集中各指标的物理量纲可能不同, 因此决策前需要通过一定的规则对决策矩阵进行规范化处理。属性类型主要有效益型、成本型、固定型、区间型<sup>[3-4]</sup>等, 而最常用是效益型和成本型。不妨设  $I_1, I_2$  分别为效益型和成本型属性的下标集, 规范化后的决策矩阵记为  $B = (b_{ij})_{m \times n}$ , 则对于效益型指标和成本型指标的规范化公式分别为

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - a_{i\min}}{a_{i\max} - a_{i\min}}, & j \in I_1 \\ \frac{a_{i\max} - a_{ij}}{a_{i\max} - a_{i\min}}, & j \in I_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $a_{i\max} = \max_{i \in M} \{a_{ij}\}$ ;  $a_{i\min} = \min_{i \in M} \{a_{ij}\}$ 。

### 2.2 熵权法确定指标权重

由规范化后的决策矩阵  $B = (b_{ij})_{m \times n}$ , 计算第  $j$  个指标  $v_j$  的熵值  $H_j$  为<sup>[8]</sup>

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m (\bar{b}_{ij} \ln \bar{b}_{ij}), \quad j \in N \quad (2)$$

式中,  $k = (\ln m)^{-1}$ ;  $\bar{b}_j = \frac{b_j}{\sum_{i=1}^m b_j}$ , 并假定当  $\bar{b}_j = 0$  时,  $\bar{b}_j \ln \bar{b}_j = 0$ 。

依据得出的  $H_j$ , 计算第  $j$  个指标  $v_j$  的熵权, 为

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}, j \in N \tag{3}$$

指标权重确定后, 则加权的规范化决策矩阵记为  $C = (c_{ij})_{m \times n}$ , 其计算公式为

$$c_{ij} = w_j \times b_{ij}, i \in M; j \in N \tag{4}$$

### 2.3 贴近度计算

分别称  $\Phi^+ = (c_j^+)$ ,  $\Phi^- = (c_j^-)$  ( $j \in N$ ) 为正理想点和负理想点<sup>[9]</sup>, 其中

$$c_j^+ = \max_{i \in M} c_{ij} \tag{5}$$

$$c_j^- = \min_{i \in M} c_{ij} \tag{6}$$

记  $\Psi^+ = (d_i^+)$ ,  $\Psi^- = (d_i^-)$  ( $i \in M$ ), 其中

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^+)^2} \tag{7}$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - c_j^-)^2} \tag{8}$$

分别称  $d_i^+$ 、 $d_i^-$  为方案  $u_i$  与正理想点  $\Phi^+$ 、负理想点  $\Phi^-$  的贴近度。 $d_i^+$ 、 $d_i^-$  的物理意义是:  $d_i^+$ 、 $d_i^-$  越小表明方案  $u_i$  分别与正理想点和负理想点的相似程度越大。

### 2.4 综合指标值的计算

设方案  $u_i$  的综合排序指标值向量为  $Z = (z_i)$  ( $i \in M$ ), 其中

$$z_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \tag{9}$$

按照综合指标值的大小对方案进行排序, 综合指标值越大的方案越优。

## 3 分层 TOPSIS 法

### 3.1 一般 TOPSIS 法的求解步骤

根据第 2 节的分析, TOPSIS 法排序模型的求解步骤如下:

**步骤 1** 设有一 MADM 问题, 其决策矩阵为  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ , 则由式(1)得规范化后的决策矩阵  $B = (b_{ij})_{m \times n}$ ;

**步骤 2** 由式(2)~式(3)求各指标权重  $w_j$ , 由式(4)求加权规范化决策矩阵  $C = (c_{ij})_{m \times n}$ ;

**步骤 3** 由式(5)~式(6)求正理想点  $\Phi^+ = (c_j^+)$  和负理想点  $\Phi^- = (c_j^-)$ , 并由式(7)~式(8)求方案  $u_i$  与  $c^+$ 、 $c^-$  的贴近度;

**步骤 4** 由式(9)求取方案  $u_i$  的综合排序指标值  $z_i$ , 按  $z_i$  的大小顺序确定方案优劣。

### 3.2 分层 TOPSIS 法的求解步骤

若属性集中指标过多(一般多于 10 个), 同时各指标按一定规则可以进行聚类时, 为避免因指标过多而带来的权重难以分配的问题, 可以对各指标进行分类, 然后对每类指标集分别运用第 3.1 节所述的求解方法, 求出各方案在每类指标下的综合指标值, 再以各类综合指标值作为方案  $u_i$  按指标  $v_j$  进行测度所得到的值, 重复以上过程, 直至最终获得方案集的综合排序指标值。

## 4 算例分析

### 4.1 方案集和属性指标值的选取

选取 E-3F、E-2C、A-50 和 Falcon 4 型 EWA 作为待评方案, EWA 作战效能评估指标体系见图 1, 则方案集和属性集分别为:  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{E-3F, E-2C, A-50, Falcon\}$  和

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{载机性能, 探测引导性能,} \\ \text{通信传输性能, 自卫电子战能力} \end{array} \right\}$$

属性集  $V$  中各属性可分别表示为

$$\begin{aligned} v_1 &= \{\text{载机性能}\} = \{v_1^1, v_2^1, v_3^1\} = \\ &\{\text{最大续航时间, 最大起飞重量, 最大飞行速度}\} \\ v_2 &= \{\text{探测引导性能}\} = \{v_1^2, v_2^2, v_3^2, v_4^2, v_5^2, v_6^2\} = \\ &\left\{ \begin{array}{l} \text{雷达最大探测距离, 雷达搜索总方位角,} \\ \text{雷达体制, 最大引导批次, 雷达抗干扰能力,} \\ \text{ESM, CSM 能力} \end{array} \right\} \\ v_3 &= \{\text{通信传输性能}\} = \{v_1^3, v_2^3, v_3^3\} = \\ &\{\text{总通信道, 数据交联水平, 通信抗干扰能力}\} \end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned} v_4 &= \{\text{自卫电子战能力}\} = \{v_1^4, v_2^4\} = \\ &\{\text{综合威胁告警能力, 电子对抗能力}\} \end{aligned}$$

由于 EWA 系统是各国重点保密的对象之一, 因此很多指标数据无法获取准确值, 只能综合考虑加以估计, 参考文献[14~15]中的数据, 可给出 EWA 系统效能指标的取值见表 1(表中数据仅为示范性估算值, 其中最大引导批次是仅考虑人工引导方式下的最大引导批次)。

表 1 不同 EWA 系统的指标值

	$v_1^1/h$	$v_2^1(t)$	$v_3^1/(km/h)$	$v_4^1/km$	$v_5^1/(^\circ)$	$v_6^1$	$v_7^1/批$	$v_8^1$	$v_9^1$	$v_{10}^1/个$	$v_{11}^1$	$v_{12}^1$	$v_{13}^1$	$v_{14}^1$
$u_1$	13	148	950	370	360	0.9	18	1.0	1.0	28	1.0	1.0	1.0	1.0
$u_2$	6.5	24	626	408	360	0.7	6	0.8	0.7	8	0.9	0.8	0.8	0.7
$u_3$	8	190	850	360	360	0.8	14	0.8	0.8	15	0.9	0.8	1.0	1.0
$u_4$	11.5	148	1000	400	260	1.0	14	0.9	0.9	18	0.8	0.9	0.8	0.9

### 4.2 分层综合指标值的计算

对属性  $v_1$ , 由表 1 可得其决策矩阵为

$$A_1 = \begin{pmatrix} 13 & 148 & 950 \\ 6.5 & 24 & 626 \\ 8 & 190 & 850 \\ 11.5 & 148 & 1000 \end{pmatrix}$$

式中, 下标 1 表示针对分层属性  $v_1$ , 后文的下标含义类似。 $v_1^1$ 、

$v_2^1$  和  $v_3^1$  为效益型指标, 则由式(1)得规范化后的决策矩阵为

$$B_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0.75 & 0.87 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.23 & 1 & 0.60 \\ 0.77 & 0.75 & 1 \end{pmatrix}$$

由式(3)~式(4)得各属性权重集为  $W_1 = \{0.41, 0.29, 0.30\}$ , 并由式(5)得加权的规范化决策矩阵为

$$C_1 = \begin{pmatrix} 0.41 & 0.22 & 0.26 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.09 & 0.29 & 0.18 \\ 0.32 & 0.22 & 0.30 \end{pmatrix}$$

由式(6)~式(7)得正理想点  $\Phi_1^+ = (0.41, 0.29, 0.30)$  和负理想点  $\Phi_1^- = (0, 0, 0)$ 。由式(8)~式(9)得方案  $u_i$  与正理想点  $\Phi_1^+$ 、负理想点  $\Phi_1^-$  的贴近度分别为  $\Psi_1^+ = (0.08, 0.58, 0.34, 0.11)$  和  $\Psi_1^- = (0.53, 0, 0.35, 0.49)$ 。由式(10)得方案  $u_i$  的综合排序指标值集合为  $Z_1 = (0.87, 0, 0.51, 0.82)$ 。单从载机性能看, E-3F 和 Falcon 较好, A-50 次之, E-2C 较差。这与实际情况较为吻合, E-3F 和 Falcon 采用的载机均为波音 707 系列, A-50 采用的载机为伊尔-76, 而 E-2C 则是专门为舰载而设计的飞机。

对属性  $v_2, v_3$  和  $v_4$  的计算方法与前述过程类似, 这里主要给出计算结果为

$$W_2 = \{0.20, 0.11, 0.15, 0.13, 0.30, 0.11\}$$

$$Z_2 = (0.69, 0.38, 0.30, 0.59)$$

单从探测引导性能看, E-3F 和 Falcon 较好, E-2C 次之, A-50 较差。

$$W_3 = \{0.26, 0.23, 0.51\}$$

$$Z_3 = (1, 0.17, 0.21, 0.45)$$

单从通信传输性能看, E-3F 和 Falcon 较好, A-50 次之, E-2C 较差。

$$W_4 = \{0.69, 0.31\}$$

$$Z_4 = (1, 0, 1, 0.23)$$

单从自卫电子战能力看, E-3F 和 A-50 较好, Falcon 次之, E-2C 较差。

### 4.3 EWA 综合效能指标值的计算

以  $A = (Z_1^T, Z_2^T, Z_3^T, Z_4^T)$  作为 EWA 效能评估指标体系的决策矩阵。则由第 3.1 节所述内容可得(计算过程与前类似, 从略)

$$W = \{0.17, 0.23, 0.36, 0.24\}$$

$$Z = (1, 0.1, 0.38, 0.47)$$

可知, E-3F 效能最佳, Falcon 较好, A-50 略次之, E-2C 较差。这与实际结果也较为相符, E-3F 是 E-3 出口法国的改进型, 法国对其部分电子系统进行了改进; Falcon 是以色列上世纪 80 年代末研制成功的采用相控阵雷达技术的 EWA, 其性能也代表了当今世界 EWA 发展的先进水平; A-50 是前苏联以伊尔-76 大型运输机为平台, 于 1984 年装备部队的 EWA, 其性能总体而言劣于 E-3; E-2C 是舰载 EWA, 受其任务功能的限制, 其价值更多的体现在对航母编队作战帮助上。

## 5 结束语

EWA 效能评估是武器装备效能评估的研究内容之一。针对属性指标较多时, 各指标权重难以分配的问题, 本文提出一种分层 TOPSIS 法来对 EWA 效能进行评估, 充分利用已知信息, 运用熵权法确定指标权重, 较好地解决了权重分配时人的主观因素的影响。通过对四型 EWA 作战效能的评估, 表明文中所提方法的有效性和可行性。

### 参考文献:

[1] 裴云. 预警机系统防空预警及拦截引导效能分析与评估[J]. 电

光与控制, 2007, 14(6): 43-47, 59. (Pei Y. Effectiveness analysis and evaluation of early-warning aircraft in air-defense early-warning and intercept guidance[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(6): 43-47, 59.)

[2] 陈浩, 雷英杰. 基于防空预警使命的预警机系统效能分析[J]. 军事运筹与系统工程, 2006, 20(4): 25-29. (Chen H, Lei Y J. System effectiveness analysis of AWACS on early-warning for aerial defense[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2006, 20(4): 25-29.)

[3] Hwang C L, Yoon K. *Multiple attribute decision making: methods and applications: a state-of-the-art survey* [M]. New York: Springer-Verlag, 1981.

[4] Vincke P. *Multicriteria decision making: advances in MCDM models, algorithms, theory and applications* [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers Group, 1999.

[5] Ma J, Fan Z P. A subjective and objective integrated approach to determine attribute weights[J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 112(2): 397-404.

[6] Teclé A. Selecting a multicriterion decision making technique for water resources management[J]. *Water Resources Bulletin*, 1992, 28(2): 129-140.

[7] Li D F. An approach to fuzzy multiattribute decision making under uncertainty[J]. *Information Sciences*, 2005, 169(1): 97-112.

[8] 尤天慧, 樊治平. 不确定性多属性决策中确定熵权的一种误差分析方法[J]. 系统工程, 2003, 21(1): 101-104. (You T H, Fan Z P. An error propagation method for assessing entropy weights in uncertain multiple attribute decision making[J]. *Systems Engineering*, 2003, 21(1): 101-104.)

[9] 卢盈奇, 王颖龙, 祝长英. TOPSIS 法用于区域防空重点保卫目标排序计算[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(2): 20-21, 28. (Lu Y Q, Wang Y L, Zhu C Y. Application of TOPSIS to sequencing computation of protected important targets in area air defense[J]. *Fire Control and Command Control*, 2006, 31(2): 20-21, 28.)

[10] Danielle S S. A methodology for the probabilistic assessment of system effectiveness as applied to aircraft survivability and susceptibility[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2002.

[11] 贺媛媛, 胡晓峰. 指挥自动化系统效能评估方法探索[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 723-726. (He X Y, Hu X F. Research on method of measure the synthesis effectiveness of C<sup>4</sup>ISR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(5): 723-726.)

[12] 魏继才, 胡晓峰. 武器系统效能建模方法研究与应用[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 20-24. (Wei J C, Hu X F. Modeling method of weapon system's effectiveness and its applications[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(6): 20-24.)

[13] 胡晓慧, 蓝国兴, 申之明, 等. 武器装备效能分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. (Hu X H, Lan G X, Shen Z M, et al. *Effectiveness analysis method of weapon system* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)

[14] 郇能敬. 预警机系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (Li N J. *Introduction of AWACS system* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.)

[15] 朱宝鑫, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 2 版. 北京: 航空工业出版社, 2006: 254-274. (Zhu B L, Zhu R C, Xiong X F. *Effectiveness evaluation of combat plane* [M]. 2nd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.)