

基于 ADC 模型的临近空间信息系统效能评估体系研究

戴 静, 宋 敏

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘 要: 针对临近空间信息系统(NSIS)技术发展迅速, 缺乏通用性验证, 系统设计周期、结果风险较大问题, 首次提出了 NSIS 的效能评估体系. 根据 NSIS 结构体系、评估指标复杂、层次较多特点, 在 ADC 评估框架的基础上, 建立了基于层次分析法(AHP)的效能评估体系, 并提出了基于灰度的人在回路信息系统数学评估模型, 为建立有效、稳定的 NSIS 能力评估模型提供了有效手段.

关键词: 临近空间; 信息系统; 效能评估; 层次分析法

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)05-0144-04

Effectiveness Evaluation System of Near Space Information System Based on ADC

DAI Jing, SONG Min

(School of Telecommunications Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: As Near Space Information System (NSIS) doesn't have effectiveness estimation system, the process and result of design take a risk, so effectiveness evaluation system (EES) of NSIS is proposed for the first time. According the characteristic that the structure of NSIS and evaluation guide lines are complex, the ADC evaluation architecture which integrated Analytic Hierarchy Process (AHP) is set up. EES solved the problem that distributing weight of system ability, and put forward math evaluation model of NSIS ability and its sub target. The system provided an effective way to demonstrate cost, feasibility and risk of NSIS.

Key words: near space; information system; effectiveness evaluation; analytic hierarchy process

1 引言

伴随战场环境进一步恶化, 临近空间技术的发展, 由于临近空间飞行平台(NSFP)距离地面位置适中、具有较大覆盖范围、较高地面分辨率和成像灵敏度、安全性高、生存能力强、部署快速、消费比高的优点, 逐步成为各国军事领域的研究重心. 美军也继 1998 年推出《长期规划—2020 年构想》提出未来空间作战的四大概念. 为有效控制空间, 确保空间优势美军在 2005 年的“施里弗 3”太空战演习中, 美军首次将临近空间纳入空间作战范畴”而 NSFP 由于所处环境、承担任务的特殊性, 其信息系统则成为平台的核心子系统^[1].

虽然国内外对作战兵器的作战使用效能进行了一系列的研究^[1-3], 但由于影响 NSFP 相关技术的因素多样, 且信息系统设备相对复杂、技术更新周期短、基层指标属性不明确, 导致建立通用的效能评估指标体系难度较大, 到目前为止还没有对临近空间信息系统(NSIS)效能评估的研究, 缺少对信息系统需求、安全机制、工作流程和结果的评估和验证, 设计阶段没有可用于验证的效能评估体系.

文中首先采用美国工业界武器系统效能咨询委员会(WSEIAC)的 ADC 模型^[4]建立 NSIS 效能评估顶层框架, 而后结合基于层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 的分解方法对系统能力指标进行解算, 首次建立了 NSIS 效能评估体系, 为

收稿日期: 2010-05-27; 修回日期: 2010-07-20

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2008AA * * 109)

NSIS 进入设计阶段前得到充分的验证提供了有效手段。

2 NSIS 评估体系需求

NSIS 作为 NSFP 的重要组成部分,伴随 NSFP 作战使用频率和依赖性的提高,对其安全性、可靠性、生存能力、数据处理能力、研制周期和费用提出了更高的要求,突显了对 NSIS 进行全面、系统评估的重要性、紧迫性。为有效分析 NSIS 的效能指标体系,结合 WSEIAC 对武器效能的定义^[5]将 NSIS 效能定义如下:单位成本条件下信息系统通信、成像、获取、传递信息能力的量度。

目前 NSFP 应用领域还很有限,但其发展迅速,应用领域也将日渐广泛,仅对 NSIS 进行局部或针对单一作战使用进行效能分析,显然不能满足 NSFP 飞速发展的效能评估需求,不能有效满足其功能的扩展性,评估结果不具备延续性。同时由于 NSFP 使用时有较高的环境要求,其实时效能会因环境好坏、技术人员素质或 NSFP 本身性能的不同而有所差异,因此如果对外界因素考虑不成熟会导致决策产生较大的局限性和风险性。因此要完成对 NSIS 效能评估,评估模型须满足以下需求:

(1) 广泛性。能够实现临近空间信息系统相对广泛的应用涉及领域的评估,而不仅仅针对某一应

用。(2)全面性。可以从系统设计阶段开始到系统定型进行全面的评估。(3)稳定性。要求评估模型指标相对独立,受外界因素影响较小。(4)延续性。要求评估模型方便扩展新的评估指标,对临近空间信息系统做出新的评估。(5)可靠性。要求评估体系科学、完整,有较高的可信性。

3 NSIS 通用效能评估方法

3.1 基于 ADC 的系统评估框架及流程

在军事应用领域,NSIS 并不直接构成战斗力,而是通过提升成像清晰度、系统安全性和生存能力、信息的获取传递能力,从而最终提升武器系统的作战效能,因此其能力的评价应集中于通信、安全和生存等能力的评价。

如图 1 所示,文中首先采用 ADC 模型,对效能评估体系进行顶层设计,将系统开始执行时的状态由“可用性 A”描述,执行任务过程中状态由“可信性 D”描述,完成给定任务的程度由“能力 C”描述,并根据其能力分布和影响因素,划定能力次级评价指标;其次按照层次分析法(AHP)^[5]的原则确定次级指标和基层指标的权重;而后建立 NSIS 能力 C 及其构成指标的评估模型,并由基层指标的权重确定次级指标的权重,结合 NSIS 的能力评估模型决定能力指标 C,最终得出系统效能 E。

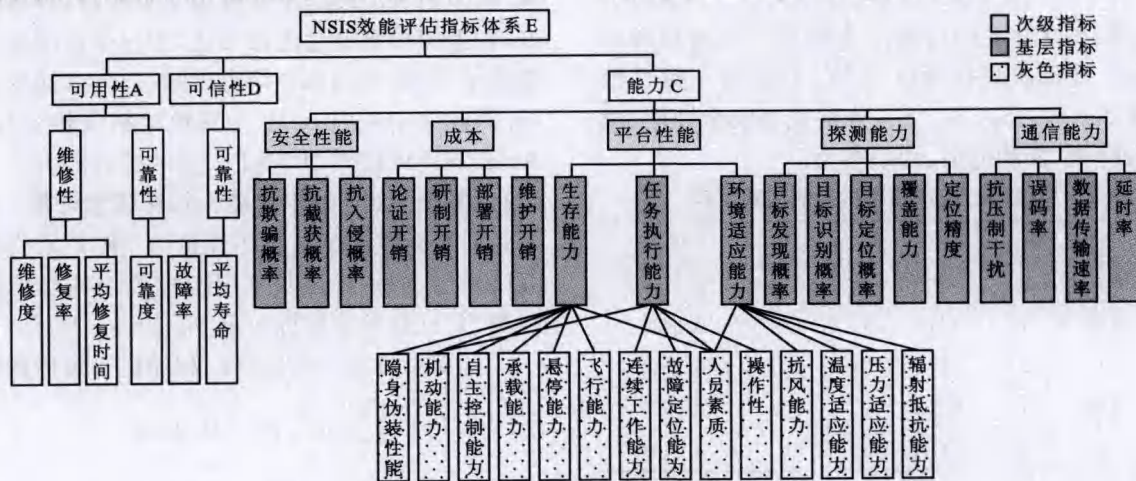


图 1 NSIS 效能评估指标体系

3.2 基于 AHP 的能力指标权值计算

3.2.1 计算步骤和相关概念

AHP 是通过因素之间的比较来获取其重要性的区别,NSIS 能力指标权值计算的基本过程可以分为四个基本步骤:构造判断矩阵、基层指标排序、次级指标排序和一致性检验,定义如下:

- 构造判断矩阵:针对上一层级中的某元素

而言,评定该层次中相关元素重要性的状况。一般采用专家打分的方式得出。

- 次级指标排序:针对能力指标,计算次级指标间的权重值。
- 基层指标排序:针对次级指标中的某元素,确定基层指标层与之有联系的元素权重值。
- 一致性检验:评价指标排序的一致性。

3.2.2 次级指标排序

根据对 NSIS 能力指标的研究,建立如图 1 所示 NSIS 能力评估层次结构,并按如下步骤计算次级指标相对权重并进行一致性检验:

① 权重计算:计算判断矩阵中每行所有元素的几何平均值

$$\begin{aligned}\bar{W} &= (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n)^T \\ &= ((\prod_{j=1}^n a_{1j})^{\frac{1}{n}}, (\prod_{j=1}^n a_{2j})^{\frac{1}{n}}, \dots, (\prod_{j=1}^n a_{nj})^{\frac{1}{n}})^T\end{aligned}$$

归一化,求得特征向量的近似值,即各元素的相对权重:

$$W = (\bar{w}_1 / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j, \bar{w}_2 / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j, \dots, \bar{w}_n / \sum_{j=1}^n \bar{w}_j)$$

② 一致性检验:计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$,计算一致性指标 C. I(Consistency Index), $C. I = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$. 由表 1 中查出相应的平均随机一致性指标 R. I(Random Index). 计算一致性比例 C. R(Consistency Ratio), $C. R = C. I / R. I$. 当 $C. R < 0.1$ 时认为判断矩阵的一致性是可以接受的;若 $C. R \geq 0.1$,就需要对判断矩阵进行调整再重新计算.

表 1 平均随机一致性指标 R. I

n	1,2	3	4	5	6	7	8	9
R. I	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.46	1.49

选择 1~9 标度构造基层指标排序判断矩阵如表 2 所示. 计算次级指标权重 W_S 并进行一致性检验,其中 S_{Sa} 、 S_{Co} 、 S_{Pl} 、 S_{De} 、 S_{CM} 分别代表安全性能、成本、平台性能、探测能力、通信能力.

表 2 目标层 C 与次级指标间的判断矩阵

S	S_{Sa}	S_{Co}	S_{Pl}	S_{De}	S_{CM}	W_S
S_{Sa}	1	2	1/2	2	1/2	0.1763
S_{Co}	1/2	1	1/3	1	1/3	0.0986
S_{Pl}	2	3	1	3	1	0.3133
S_{De}	1/2	1	1/3	1	1/3	0.0986
S_{CM}	2	3	1	3	1	0.3133

$C. I = 0.0033$, $C. R = 0.0030$, $C. R < 0.1$,符合一致性检验标准,判断矩阵可以接受.

3.2.3 基层指标排序

同样方法以平台性能 S_{Pl} 为例,如表 3 所示首先构造其子指标矩阵,计算平台性能指标权重 W_{Pl} 并进行一致性检验. 其中, P_S 、 P_M 、 P_E 分别代表平台性能中的生存能力、任务执行能力、环境适应能力.

$C. I_{Pl} = 0$, $C. R_{Pl} = 0$, $C. R_{Pl} < 0.1$,符合一致性

检验标准判断矩阵可以接受. 同样可以计算安全性能权重 W_{Sa} 、成本权重 W_{Ex} 、探测能力权重 W_{De} 、通信能力权重 W_{Co} 如表 4 所示.

表 3 关于平台性能的判断矩阵

S_{Pl}	P_S	P_M	P_E	W_{Pl}
P_S	1	1	2	0.4000
P_M	1	1	2	0.4000
P_E	1/2	1/2	1	0.2000

表 4 关于平台性能的判断矩阵

次级指标权重	指标权重
安全性能 W_{Sa}	[0.4268, 0.1429, 0.4286]
成本 W_{Ex}	[0.1250, 0.1250, 0.3750, 0.3750]
探测能力 W_{De}	[0.4882, 0.2215, 0.1342, 0.0780, 0.0780]
通信能力 W_{Co}	[0.5222, 0.1988, 0.1988, 0.0781]

4 基于灰度的灰色指标判定

指标的可靠性、准确性和相互权重是影响 NSIS 能力评估模型结果有效性和准确性的关键. 对于定量指标,由于指标内部结构、参数、特性信息确知,可以直接计算使用;而对于定性指标,其部分信息未知,需要对其进行定量和定性的分析,称为灰色指标. 而平台性能的底层指标由于不能量化,只能用较好,较差等模糊概念进行描述,指标很难用确切的数量表示,是典型的部分信息已知、部分未知的灰色系统. 因此文中采用 AHP 与灰色评估法相结合,形成 AHP 灰色评估模型,确定人员的综合能力.

4.1 基于 AHP 的平台能力指标权值计算

对平台性能的灰色指标构造判断矩阵得出其相互权重后,分别计算其基层指标关于各自子指标的权重,并计算基层指标权重 W_{Pl} 如表 5 所示.

计算总排序一致性指标和随机一致性指标:

$$C. I = \sum_{i=1}^3 w_{Pi} C. I_i = 0.0146$$

$$R. I = \sum_{i=1}^3 w_{zi} R. I_i = 1.216$$

层次总排序随机一致性比率:

$$C. R = C. I / R. I = 0.012 < 0.10$$

因此,关于平台性能 S_{Pl} 灰色指标排序的计算结果具有满意的一致性.

4.2 制定评价指标的评分标准并求评价样本矩阵

根据评价需要,将评价指标的优劣等级划分为 n 个等级,并合理制定各等级的评分值. 在评估系统

确定后,邀请相关领域的权威专家对评价指标打分,确保评分的可信性.在专家评分后,应该对各指标的评分进行判断,如果某一项指标的专家评分相差悬殊,应该组织专家进行讨论,以取得合理的评分,从而确保评分的可靠性.文中根据需要制定评分标准,如表6所示,其中 t 为评分值.

表5 基层指标权重

B	Z	P _S P _M P _E			W _{Gray}
		0.4000	0.4000	0.2000	
B _{Pre}		0.2347			0.0939
B _{Mov}		0.2347	0.0612		0.1184
B _{Sec}		0.0959			0.0384
B _{Loa}		0.0281			0.0112
B _{Ins}		0.0281			0.0112
B _{Hig}		0.1438			0.0575
B _{SWo}			0.3365		0.1346
B _{FDc}			0.0612		0.0245
B _{PeA}		0.2347	0.2047	0.0589	0.1875
B _{UL}			0.3365		0.1346
B _{AWi}				0.1428	0.0286
B _{TAd}				0.1428	0.0286
B _{PAd}				0.2490	0.0498
B _{RAd}				0.4065	0.0813

表6 评分标准

评判标准	$8 \leq t < 10$	$6 \leq t < 8$	$4 \leq t < 6$	$t < 4$
评判等级	很好	好	较好	一般

假设有 p 个评分专家,组织专家依据评分等级标准对各指标打分,确定其评价样本矩阵 Q 如下:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{111} & q_{112} & \cdots & q_{11p} \\ q_{121} & q_{122} & \cdots & q_{12p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{ij1} & q_{ij2} & \cdots & q_{ijp} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8 & 9 & 6 & 8 & 8 & 8 & 8 & 7 & 7 & 7 & 7 & 8 & 8 & 7 & 8 & 6 \\ 9 & 8 & 6 & 7 & 7 & 9 & 8 & 7 & 6 & 7 & 8 & 7 & 9 & 8 & 8 & 9 \\ 7 & 9 & 6 & 7 & 7 & 7 & 9 & 7 & 6 & 8 & 8 & 7 & 7 & 8 & 7 & 8 \\ 9 & 8 & 7 & 7 & 8 & 8 & 8 & 8 & 6 & 7 & 7 & 8 & 8 & 7 & 9 & 8 \\ 8 & 9 & 6 & 8 & 8 & 7 & 8 & 7 & 6 & 7 & 9 & 7 & 8 & 8 & 8 & 9 \end{bmatrix}^T$$

4.3 确定灰类与灰色评价矩阵

根据灰数定义:指仅知道大概范围而不知道其确切的数,通常记为“ $\otimes$ ”.确定评价灰类 $e = 1, 2, \dots, g$ 就是要确定评价灰类的等级数、灰类的灰数以

及灰数的白化权函数 $f_e(q_{ijk})(k = 1, 2, \dots, p)$,根据问题需要,采用如下灰类和白化权函数:

第一灰类“很好”($e = 1$),灰数 $\otimes_1 \in [0, 8, +\infty]$,白化权函数为 f_1 :

$$f_1(q_{ijk}) = \begin{cases} q_{ijk}/8 & q_{ijk} \in [0, 8] \\ 1 & q_{ijk} \in (8, +\infty) \\ 0 & q_{ijk} \notin [0, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

第二灰类“好”($e = 2$),灰数 $\otimes_2 \in [0, 8, 16]$,白化权函数为 f_2 :

$$f_2(q_{ijk}) = \begin{cases} q_{ijk}/8 & q_{ijk} \in [0, 8] \\ 2 - q_{ijk}/8 & q_{ijk} \in (8, 16] \\ 0 & q_{ijk} \notin [0, 16] \end{cases} \quad (2)$$

第三灰类“较好”($e = 3$),灰数 $\otimes_3 \in [0, 4, 8]$,白化权函数为 f_3 :

$$f_3(q_{ijk}) = \begin{cases} q_{ijk}/4 & q_{ijk} \in [0, 4] \\ 2 - q_{ijk}/4 & q_{ijk} \in (4, 8] \\ 0 & q_{ijk} \notin [0, 8] \end{cases} \quad (3)$$

第四灰类“一般”($e = 4$),灰数 $\otimes_4 \in [0, 2, 4]$,白化权函数为 f_4 :

$$f_4(q_{ijk}) = \begin{cases} 1 & q_{ijk} \in [0, 2] \\ 2 - q_{ijk}/2 & q_{ijk} \in (2, 4] \\ 0 & q_{ijk} \notin [0, 4] \end{cases} \quad (4)$$

其中,灰数表示指标 q_{ijk} (第 k 个专家对指标 V_{ij} 的评分)对应的等级,灰数中的数值分别表示评分可能分布的区间,中间值表示属于该灰类的最佳评分值,计为 d_i .

将专家就评价指标 V_{ij} 属第 e 个灰类的灰色评价权记为 r_{ije} ,对于评价指标 V_{ij} ,第 e 个评价灰类的灰色评价系数记为 x_{ije} ,各评价灰类的总灰色评价系数记为 x_{ij} ,可得 V_i 所属指标 V_{ij} 对于各个评价灰类的灰色评价矩阵 R_i :

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i1} \\ \vdots \\ r_{ij} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1g} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \cdots & r_{ijg} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $x_{ije} = \sum_{k=1}^p f_e(q_{ijk})$, $x_{ij} = \sum_{e=1}^g x_{ije}$, $r_{ije} = \frac{x_{ije}}{x_{ij}}$.

4.4 确定灰类与灰色评价矩阵

首先指标体系做一级综合评价其结果记为 B_i , $B_i = W_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ig})$,由 B_i 得到总灰色评价权矩阵 $R = (B_1, B_2, \dots, B_m)^T$,则二级综合评价结果 $B = W \cdot R$.其中, W 表示各因素的权重.而后对各灰类等级按“灰水平”赋值,得各评价灰类等级值

(下转第151页)

的循环,一方面与本算法采用的出包规则相关(本算法在以解向量分量为禁忌对象的迭代过程中,选择包中体积最大的物品出包);另一方面在于实验数据规律性的高低,在第3到第7组实验数据的计算过程中,由于其规律性较强,其在首次迭代中循环较大。

5 结束语

从表1和图2~图8不难看出,基于双禁忌对象的禁忌搜索算法的求解0-1背包问题最终结果明显优于遗传算法,从这表明文中算法在求解0-1背包问题时是可行的、有效的。文中禁忌搜索算法采用双禁忌对象策略,实现了搜索范围的扩大与缩小,在一定程度上协调了搜索的集中性与多样性之间的矛盾。该策略可推广应用其他组合优化问题的求解,如任务分配问题、车辆路径问题等,将是下一步进行的工作。

参考文献:

- [1] Christophe Wilbaut, Saïd Salhi, Saïd Hanafi. An iterative variable-based fixation heuristic for the 0-1 multidimensional knapsack problem [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(2): 339-348.
- [2] Brahim Aghezzaf, Mohamed Naimi. The two-stage recombination operator and its application to the multiobjective 0/1 knapsack problem: A comparative study [J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(12): 3247-3262.
- [3] Garg M L, Sunanda Gupta. An improved genetic algo-

rithm based on adaptive repair operator for solving the knapsack problem [J]. Journal of Computer Science, 2009, 5(8): 544-547.

- [4] Boyer V, Elkihel M, ElBaz D. Heuristics for the 0-1 multidimensional knapsack problem [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(3): 658-664.
- [5] Matthew R Gibson, Jeffrey W Ohlmann, Michael J Fry. An agent-based stochastic ruler approach for a stochastic knapsack problem with sequential competition [J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(3): 598-609.
- [6] Wang Ling, Wang Xiuting, Fei, Minrui. An adaptive mutation-dissipation binary particle swarm optimizations for multidimensional knapsack problem [J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2009, 8(4): 259-269.
- [7] Cherfi Nawal, Hifi Mhand. Hybrid algorithms for the multiple-choice multi-dimensional knapsack problem [J]. International Journal of Operational Research, 2009, 5(1): 89-109.
- [8] 周本达,陈明华,任哲.一种求解0-1背包问题的新遗传算法[J].计算机工程与应用,2009,45(30):45-47.

作者简介:

朱颢东 男,(1980-),博士,CCF会员.研究方向为文本挖掘、智能信息处理、计算智能。

李红婵 女,(1983-),硕士,CCF会员.研究方向为智能信息处理。

(上接第147页)

化向量 $C = (d_1, d_2, \dots, d_g) = (8, 8, 4, 2)$, 于是计算得其平台性能指标综合评价 $W_a = BC^T = 7.6691$ 。

5 结束语

文中针对 NSIS 设计技术有效性验证的问题,首先采用 ADC 模型建立顶层评价体系,并结合 AHP 方法计算其能力指标,同时引入灰色评估法解决了 NSIS 中平台性能无法量化的问题。首次提出了 NSIS 的效能评估体系,满足了 NSIS 开发的有效性验证需求,为有效降低系统开发的风险和开销提供了理论支持。

参考文献:

- [1] 高彬,韩轲. 机载自卫闪烁干扰作战效能评估 [J]. 北京

航天航空大学学报,2008(9):101-104.

- [2] 阎代维,谷良贤,管千山. 高超声速巡航导弹作战效能建模与评估 [J]. 兵工学报,2007(6):725-728.
- [3] 胡华强,徐忠伟. 基于 Vague 集的机载电子对抗系统作战效能评估 [J]. 系统工程与电子技术,2008(5):884-886.
- [4] 徐鑫,张恒喜,基于 ADC 模型的地地导弹武器系统作战效能评估 [J]. 弹箭与制导学报,2005(2):63-67.
- [5] 王湛,周文瑜,韩彦明. 基于 AHP 法的天波超视距雷达作战效能评估模型 [J]. 电子对抗,2006(6):28-30.

作者简介:

戴静 女,(1982-),博士研究生.研究方向为临近空间作战应用研究。