

基于灰色层次分析法的空间武器作战效能评估

轩永波, 黄长强, 王勇, 韩统, 宋磊, 李望西

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要 为对空间武器系统作战效能进行评估, 论文研究了空间武器系统的组成, 建立了空间武器系统的作战效能评估指标; 针对空间武器系统部分信息已知, 部分信息未知的特点, 通过改进的标度矩阵法确定权重的大小, 结合层次分析法和灰色理论对空间武器系统作战效能进行评估; 最后通过算例验证了所建模型是合理、可行的。

关键词 空间武器; 效能评估; 灰色层次分析法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.007

中图分类号 V321.2⁺2 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0032-06

随着航天高技术的迅速发展, 空间逐渐成为国家利益和安全的战略制高点, 从当今航天的发展来看, 空间武器得到较快的发展, 其作战使用也逐渐进入实战化阶段。因此, 开展空间武器作战效能评估研究, 对进行空间武器体系建设的顶层设计与规划论证及作战运用研究具有重要的意义。

空间武器系统是一个复杂的大系统, 评价其效能的战术技术指标较多, 有许多指标没有确切的定量指标值, 而且各战术技术指标相互影响, 相互制约, 各指标对总体的效能影响也不相同, 因此很难完全真实地反映它们的好坏程度, 这就导致对其作战效能进行评价时, 所依据的信息是不确切的、不完全的。通常把信息部分明确、部分不明确的系统称为灰色系统。

本文运用灰色理论和层次分析法相结合对空间武器系统作战效能进行评估, 有助于提高评估的科学性和精确性。

1 空间作战武器系统分析

空间武器是部署在宇宙空间用于打击、破坏与干扰空间目标以及从空间攻击陆地、海洋与空中目标的所有武器及其配套设施的统称。空间武器是进行天战的基本手段。

空间武器系统主要有4部分组成: ①空间信息保障系统; ②空间攻防对抗系统; ③空间勤务保障系统; ④及空间作战指挥系统。其中, 空间信息保障系统完成信息获取、处理和传输, 目的是提供实时或近实时的战场信息。空间攻防对抗系统目的是攻击敌方各类重要目标、确保己方空间系统或地面目标的安全。为了确保顺利遂行空间作战任务, 空间武器系统中应包含勤务保障系统, 为各种空间作战行动提供空间运输、物资供应、装备技术维护等保障任务。同时, 在空间作战中还必须建立空间作战指挥系统, 以确保对上述3种空间力量实施有效的指挥与控制^[1]。其基本构成见图1。

* 收稿日期: 2010-09-27

基金项目: 空军工程大学研究生科技创新计划资助项目(DX2010108)

作者简介: 轩永波(1984-), 男, 河北秦皇岛人, 博士生, 主要从事先进战斗机作战决策和临近空间武器作战效能评估研究。E-mail: xuan Yongbo@163.com

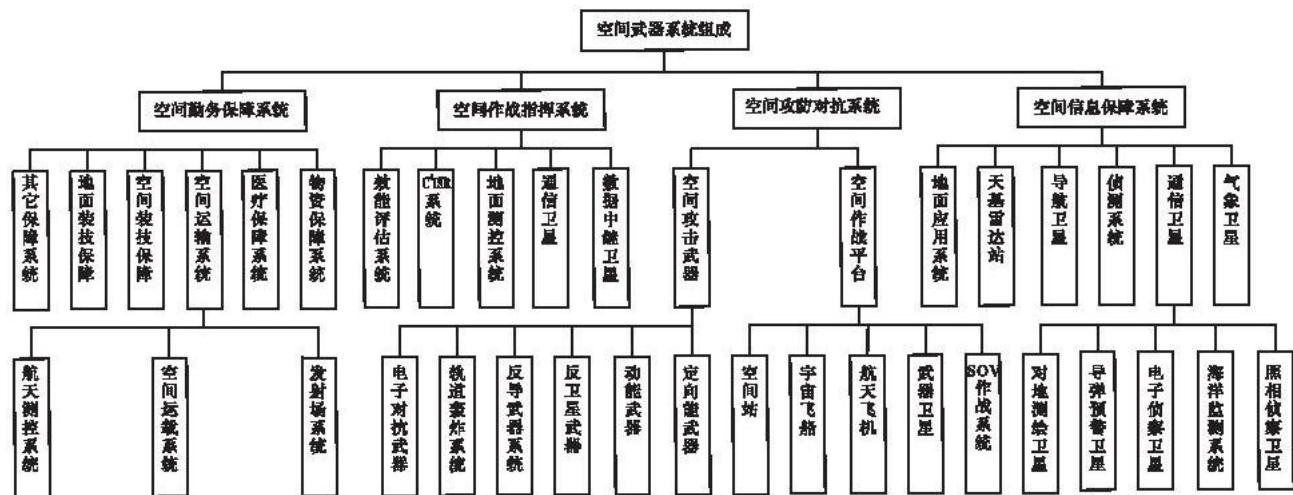


图1 空间武器系统组成

Fig.1 The structure of space weapon system

根据空间武器系统的组成,本文建立的空间武器系统效能评估的指标简化见图2。

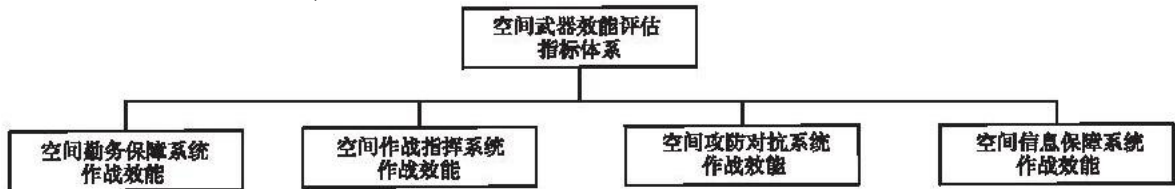


图2 空间武器系统效能评估指标

Fig.2 The guide line of effectiveness evaluation for space weapon system

2 改进的灰色层次分析法

灰色系统理论以“部分信息已知,部分信息未知”的小样本,不确定性系统为研究对象。层次分析法则是一种定量分析与定性分析相结合多目标、多准则的评价决策方法。层次分析法和灰色评估法各具优点,通过层次分析法合理确定评价对象的层次结构与指标权重,指标的量化和比较则是通过灰数和白化权函数取得。灰色层次分析法能充分借助专家经验,在定性分析的基础上定量化处理,对评估对象做科学评估,是一种有效的综合评估方法。

2.1 构建评价对象的多级递阶结构

首先把评价对象分解成为若干层次,每一层次又由若干要素组成^[2-7]。以同一层次元素作为准则,它对下一层次元素起支配作用,同时又受到上一层次元素的支配,这种从上至下的支配关系就形成了一个递阶层次结构。 V 代表一级评价指标 V_i 组成的集合,记为 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$; V_i 代表二级评价指标 V_{ij} 组成的子集合,记为 $V_i = \{V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{ij}, \dots\}$ 。

2.2 改进的层次分析法确定评价指标权重

利用层次分析法确定权重主要有以下3个步骤:

1) 对同一层次各元素关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较,构造两两比较判断矩阵。

通常按“1-9标度法”来评定标度,对各指标的重要性比较、判断、定量化,构造判断矩阵 $A = \{a_{ij} | i, j = 1, 2, \dots, n\}$,其中 a_{ij} 表示第 i 个指标与第 j 个指标的重要程度之比。但是,“1-9标度法”有它应用的局限性。例如:若 a 比 b “略微重要”则二者的重要性在“1-9标度法”中取为 3:1,也即 0.75:0.25,这显然不够合理,而取为 0.6:0.4 则是可以接受的。因此,如果要用层次分析法进行定权,就必须对其标度的定义做出改进,使之能够比较准确地反映我们的实际需求。表1是根据上述原则给出的经过改进的标度定义。

表1 改进后的标度定义

Tab.1 An improved demarcating definition to determine weight

元素 x_i 与 x_j 重要性比较	相等	较强	强	很强	绝对强	介于二者之间
a_{ij}	5/5	6/4	7/3	8/2	9/1	5.5/4.5; 6.5/3.5; 7.5/2.5; 8.5/1.5

利用改进后的标度得两两判断矩阵 A :

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \cdots & & \cdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

判断矩阵具有如下性质:① $a_{ij} = 1/a_{ji}$;② $a_{ij} > 0$;③ $a_{ii} = 1$ 。

对指标的重要性进行比较和判断时,需要集结多位专家的意见。在确定的标度定义下,由多位专家给定标度,若有 m 位专家参与评价,则对综合指标评价体系可构造判断矩阵群:

$$A_l = (a_{ij}^l)_{n \times n}, \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

在 m 位参与评价的专家中,每位专家给出的标度值 a_{ij} 可能是不同的。在 m 位专家所给的全部标度值 a_{ij} 中,客观上应存在一个最优值。为保证判断矩阵的互反性,采用几何平均法计算 a_{ij} 的最优值 a_{ij}^* ,即:

$$a_{ij}^* = \sqrt[m]{\prod_{l=1}^m (a_{ij}^l)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

利用“最小方差”概念,根据给出标度值 a_{ij}^l 与最优值 a_{ij}^* 的差异水平,确定不同专家评价水平相对权重。设第 l 位专家造成的标度误差在总的标度误差中所占的相对比例为 C_l ,有:

$$C_l = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij}^l - a_{ij}^*)^2}{\sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij}^l - a_{ij}^*)^2} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

则第 l 位专家评价水平的相对权重为:

$$\lambda_l = \left(\frac{1}{C_l} \right) / \left(\sum_{l=1}^m \frac{1}{C_l} \right), \quad l = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

专家评价水平对权向量的影响是明显的,为将各位专家水平的影响程度真实地反映到整个层次分析的运算中,利用已求得的专家水平相对权重 λ_l 重新构造判断矩阵。

设考虑专家评价水平后判断矩阵中的标度值为 b_{ij} ,为满足判断矩阵的互反性条件, b_{ij} 采用加权几何平均法计算如下:

$$b_{ij} = \sqrt[m]{\prod_{l=1}^m (a_{ij}^l)^{\lambda_l}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

得到考虑专家评价水平后的判断矩阵 $B = \{b_{ij} \mid i, j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

2) 由步骤 1) 中最终确定的判断矩阵 B 计算相对权重,即对矩阵方程求解:

$$Bw = \lambda_{\max} w \quad (7)$$

式中: λ_{\max} 为特征值; w 为特征向量,经归一化后即需要所求的权重。

3) 一致性检验:① 计算一致性指标 $C. I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$;② 由表 2 中查出相应的平均随机一致性指标 $R. I$;③

计算一致性比例 $C. R = C. I / R. I$ 。当 $C. R < 0.1$ 时认为判断矩阵的一致性可接受,若 $C. R \geq 0.1$,就需要对判断矩阵进行调整再重新计算。

表2 平均随机一致性指标

Tab.2 Random index

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R. I	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.54

2.3 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。

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 为:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{111} & \cdots & q_{11p} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ q_{ij1} & \cdots & q_{ijp} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.4 确定评价灰类

确定评价灰类就是要确定灰类的等级数、灰数及白化权函数^[8-10],一般根据实际问题而定。本文采用4个评价灰类,灰类序号为 $e, e = 1, 2, 3, 4$, 分别表示优、良、中、差4种标准,相应的灰数及白化权函数如下:

第1灰类“好”($e = 1$) 灰数 $\otimes_1 \in [0, 4, +\infty]$, 白化权函数(见图3) f_1 为:

$$f_1(q_{ijk}) = \begin{cases} q_{ijk}/4 & q_{ijk} \in [0, 4] \\ 1 & q_{ijk} \in (4, +\infty) \\ 0 & q_{ijk} \notin [0, +\infty) \end{cases}$$

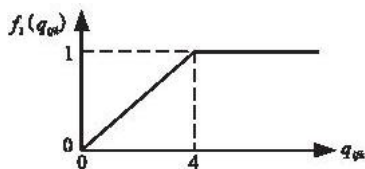


图3 白化权函数 f_1

Fig. 3 Whitening weight function f_1

第2灰类“较好”($e = 2$) 灰数 $\otimes_2 \in [0, 3, 6]$, 白化权函数(见图4) f_2 为:

$$f_2(q_{ijk}) = \begin{cases} q_{ijk}/3 & q_{ijk} \in [0, 3] \\ 2 - q_{ijk}/6 & q_{ijk} \in (3, 6] \\ 0 & q_{ijk} \notin [0, 6] \end{cases}$$

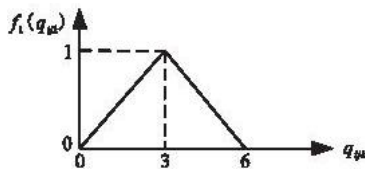


图4 白化权函数 f_2

Fig. 4 Whitening weight function f_2

第3灰类“一般”($e = 3$) 灰数 $\otimes_3 \in [0, 2, 4]$, 白化权函数(见图5) f_3 为:

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

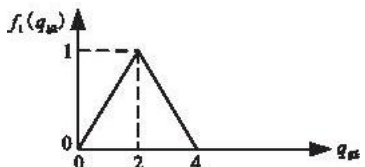


图5 白化权函数 f_3

Fig. 5 Whitening weight function f_3

第4灰类“差”($e = 4$) 灰数 $\otimes_4 \in [0, 1, 2]$, 白化权函数(见图6) f_4 为:

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

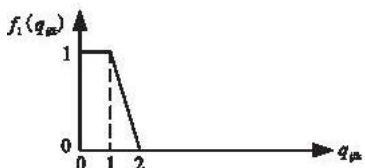


图6 白化权函数 f_4

Fig. 6 Whitening weight function f_4

其中灰数表示指标 q_{ijk} 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。

2.5 计算灰色评价矩阵

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 为:

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i1} \\ \cdots \\ r_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & \cdots & r_{i1g} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{ij1} & \cdots & r_{ijg} \end{bmatrix}$$

式中:

$$x_{ije} = \sum_{k=1}^p f_e(q_{ijk}); x_{ij} = \sum_{e=1}^g x_{ije}; r_{ije} = \frac{x_{ije}}{x_{ij}} \quad (9)$$

2.6 灰色综合评价

对 V_i 作1级综合评价,其结果记为 $D_i, D_i = A_i \cdot R_i = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ig}]$, 其中 A_i 表示 V_i 中各因素的权重。

由 B_i 得到总灰色评价权矩阵 $R = [D_1, D_2, \dots, D_m]^T$, 则 2 级综合评价结果 $D = A \cdot R$, 其中, A 表示 V 的各因素的权重。对各灰类等级按“灰水平”赋值, 得各评价灰类等级值化向量 $C = [c_1, c_2, \dots, c_g]$, 于是综合评价值 $W = D \cdot C^T$ 。

3 算例分析

根据空间武器系统作战指标, 应用灰色层次分析法对其作战效能评估如下。

3.1 计算指标权重

根据空间武器系统指标, 计算空间信息保障能力、空间攻防对抗能力、空间勤务保障能力及空间作战指挥能力的权重。邀请专家对同一层次的各元素关于上层准则的重要性进行比较, 得到判断矩阵 H :

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 1/3 \\ 1/2 & 1 & 3 & 1/4 \\ 1/4 & 1/3 & 1 & 1/6 \\ 3 & 4 & 6 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算得权重向量 $A = (0.2404, 0.1472, 0.0646, 0.5479)$; 最大特征值 $\lambda_{\max} = 4.0813$ 。

对判断矩阵 H 的最大特征值对应特征向量进行一致性检验: ① $C.I = (4.0813 - 4) / (4 - 1) = 0.0271$; ② 查表 2 知: $R.I = 0.89$; ③ 一致性比例 $C.R = C.I / R.I = 0.0304$, 则 $C.R < 0.1$, 可认为判断矩阵的一致性是可以接受的。所以 1 级评价指标 $V_i (i = 1, 2, \dots, 4)$ 的权重向量 $A = (0.2404, 0.1472, 0.0646, 0.5479)$ 。

3.2 制定评价指标的评分标准

对于定量指标可直接评定其优劣。定性指标可通过制定评价指标的评分等级将其转化为定量指标。指标评分标准见表 3, 其中 t 为评分值。

表 3 评分标准

Tab. 3 Judging grade				
评判标准	$4 \leq t < 5$	$3 \leq t < 4$	$2 \leq t < 3$	$t < 2$
评判等级	好	较好	一般	差

3.3 对各个指标进行评分

按照评分标准, 选取 5 位专家对空间武器系统的能力指标进行评分, 其评价样本矩阵 Q 为:

$$Q = \begin{bmatrix} 3.9 & 4.3 & 3.8 & 3.9 & 4.1 \\ 4.2 & 4.4 & 4.5 & 4.1 & 3.7 \\ 3.6 & 4.1 & 4.3 & 3.7 & 3.8 \\ 4.3 & 3.9 & 3.8 & 3.6 & 4.2 \end{bmatrix}$$

3.4 空间武器系统作战效能灰色综合评估

根据上述的灰色综合评价法, 计算得到空间武器系统的灰色评价矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 0.5813 & 0.3954 & 0.0237 & 0 \\ 0.6074 & 0.3741 & 0.0185 & 0 \\ 0.5473 & 0.4011 & 0.0516 & 0 \\ 0.5627 & 0.3965 & 0.0408 & 0 \end{bmatrix}$$

最终计算得到空间导弹武器作战效能为:

$$D = A \cdot R = [0.2404, 0.1472, 0.0646, 0.5479] \cdot \begin{bmatrix} 0.5813 & 0.3954 & 0.0237 & 0 \\ 0.6074 & 0.3741 & 0.0185 & 0 \\ 0.5473 & 0.4011 & 0.0516 & 0 \\ 0.5627 & 0.3965 & 0.0408 & 0 \end{bmatrix} = [0.5728,$$

$0.3933, 0.0341, 0]$ 。综合评价值: $W = D \cdot C^T = [0.5728, 0.3933, 0.0341, 0] \cdot [4, 3, 2, 1]^T = 3.5393$ 。

由此可见, 该空间武器系统的综合作战效能属于“较好”灰类, 综合评估值与专家评定相符。

4 结束语

本文构建了空间武器系统作战效能的评价指标体系, 并运用改进的灰色层次分析法定量评价了空间武

器系统的作战效能。实例表明,这种评估方法科学合理,可以减少主观因素的影响,提高了评估结论的准确性。

参考文献:

- [1] 梁金登,李东旭. 空间武器系统效能分析研究[J]. 火力与指挥控制,2009,34(5):47-50.
LIANG Jindeng,LI Dongxu. Study on effectiveness evaluation method of space weapon system[J]. Fire control and command control,2009,34(5):47-50. (in Chinese)
- [2] 张守华,孙兆辉,祝志明. 层次灰色方法在科研项目评估中的应用研究[J]. 系统工程与电子技术,2005,27(10):1744-1747.
ZHANG Shouhua,SUN Zhaohui,ZHU Zhiming. Study on hierarchy gray method applied in science research project appraisal [J]. Systems engineering and electronics,2005,27(10):1744-1747. (in Chinese)
- [3] 孙方田,马一太,李敏霞. 基于灰色-层次理论的水热水器综合评价研究[J]. 太阳能学报,2008,29(2):204-208.
SUN Fangtian,MA Yitai,LI Minxia. Comprehensive evaluation of water heater based on the grey-analytic hierarchy theory [J]. Acta energiae solaris sinica,2008,29(2):204-208. (in Chinese)
- [4] 任宏,祝连波. 基于组合权法的建筑施工企业信息化水平的多层次灰色评价[J]. 系统工程理论与实践,2008,28(2):82-88.
REN Hong,ZHU Lianbo. Multi-hierarchical grey evaluation on the construction enterprises' informatization level based on combinational weight[J]. Systems engineering-theory & practice,2008,28(2):82-88. (in Chinese)
- [5] 穆瑞,张家泰. 基于灰色关联分析的层次综合评价[J]. 系统工程理论与实践,2008,28(10):125-130.
MU Rui,ZHANG Jiatai. Research of hierarchy synthetic evaluation based on grey relational analysis[J]. Systems engineering-theory & practice,2008,28(10):125-130. (in Chinese)
- [6] 刘海燕,史志富. 导弹武器系统作战效能的灰色评估[J]. 航空兵器,2005,3(6):11-14.
LIU Haiyan,SHI Zhifu. Performance evaluation of missile weapon system with grey evaluation[J]. Aero weaponry,2005,3(6):11-14. (in Chinese)
- [7] 王亚飞,方洋旺,周晓滨. 基于AHP灰色评估法的人在回路导弹控制研究[J]. 航空兵器,2008,28(4):11-14.
WANG Yafei,FANG Yangwang,ZHOU Xiaobin. Research of missile control with man in the loop based on AHP grey evaluation method[J]. Journal of projectiles rockets missiles and guidance,2008,28(4):11-14. (in Chinese)
- [8] Chan J W K,Tong T K L. Multi-criteria material selections and end-of-life product strategy: grey relational analysis approach[J]. Materials and design,2007,28(5):1539-1546.
- [9] Wen K L. The grey system analysis and its application in gas breakdown and VAR compensator finding (invited paper)[J]. International journal of computational cognition,2004,2(1):21-44.
- [10] Przem Ienieceki J S. Mathematical methods in defense analysis[M]. Virginia: American institute of aeronautics and astronautics, 2000.

(编辑:田新华)

Effectiveness Evaluation of Space Weapon System Based on Gray Hierarchy Method

XUAN Yong-bo, HUANG Chang-qiang, WANG Yong, HAN Tong, SONG Lei, LI Wang-xi
(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: For the purpose of evaluating the effectiveness of space weapon system, this paper firstly analyzes the structure of space weapon system, then the guide line of effectiveness evaluation of space weapon system is built. Aimed at the characteristic that the information of space weapon system is partly known and partly unknown, an improved demarcating matrix method of determining the weigh is put forward, a new evaluation model which combines grey theory with analytic hierarchy process for effectiveness evaluation is presented. Finally, an example of the assessment model is calculated and the result shows that the model is reasonable, feasible and effective.

Key words: space weapon; effectiveness evaluation; gray hierarchy method