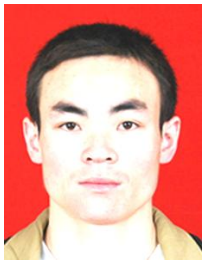
改进灰色层次效能法在临近空间平台效能评估中的应用研究

薛永江 李体方
（空军工程大学导弹学院，三原 713800）



摘要：针对临近空间平台系统的特点和应用前景，从环境适用性、飞行性能、平台性能、生存能力和可用性五个方面构建了完整的临近空间平台系统层次指标体系。结合灰色理论，在引入最优传递矩阵确定指标权重的基础上对灰色层次效能方法进行改进，实现了对临近空间平台系统效能的评估，为系统的发展提供决策参考。

关键词：临近空间平台系统；指标体系；最优传递矩阵；效能评估

Application Research on Improved Grey Hierarchy Method in Efficiency Evaluation of Near Space Aircraft

Xue Yongjiang Li Tifang
（Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800）

Abstract：Considering the characteristics of structure and application prospect of near space platform system, the hierarchy structure of efficiency evaluation is built from the acclimatization, aviation capability, platform capability, viability and availability. The grey hierarchy method is improved by defining weight of indexes with transfer method combined with grey theory. At last, the comprehensive efficiency of near space platform is evaluated, and it could provide a scientific evidence for decision making on the development of near space platform system.

Key words：near space platform system；indicators；optimal transfer matrix；efficiency evaluation

1 引言

临近空间平台系统是一种新型适合信息化远程作战平台，通过搭载不同的应用载荷能完成多样化的作战任务，相对于航天航空平台具有独特的技术和性能优势。由于临近空间平台具有发射成本低、生存能力强、效能高和响应速度快的特点，在预警探测、侦察监视、防空反导、电子对抗等方面的发展潜力越来越受到各航空大国的重视。在临近空间平台系统研制、试验过程中，对其效能进行评价是研制部门和使用部门十分关心的问题。目前，国内对临近空间平台在军事预警、侦察等军事领域的应用进行了大量的研究，但对于临近空间平台尚未给出一个完整全面的指标体系，也无法准确对其效能进行评估。

针对临近空间平台系统的特点，提出了临近空间平台效能的灰色效能评估方法。综合考虑临近空间平台系统的特点、功能和使用环境，建立了比较完整的评估指标体系，通过最优传递矩阵确定各级指标权重，解决了传统评估方法判断矩阵难以满足一致性的问题，以定量计算和定性分析相结合的方法评估了临近空间平台系统的整体效能，可以为临近空间平台发展和评估提供参考。

作者简介：薛永江（1987-），硕士，管理科学与工程专业；研究方向：管理科学与工程。
收稿日期：2010-10-11

2　临近空间平台系统

临近空间平台是指能够搭载特定任务载荷，较长时间驻留临近空间以完成特定任务的空间飞行器，是完成预定信息支援和作战任务的基础。主要分为低动态平台和高动态平台两类：低速、亚音速临近空间飞行器属于低动态飞行器，主要有高空长航时无人机、平流层飞艇和高空气球等；超音速、高超音速临近空间飞行器属于高动态飞行器，包括再入滑翔式飞行器、高超声速巡航飞行器和组合动力飞行器等，本文主要开展对低速临近空间平台效能的研究。根据临近空间的功能、特点和使用环境，分别从环境适用性、飞行性能、平台性能、生存能力和可用性五个方面建立起层次指标体系（见图1）。

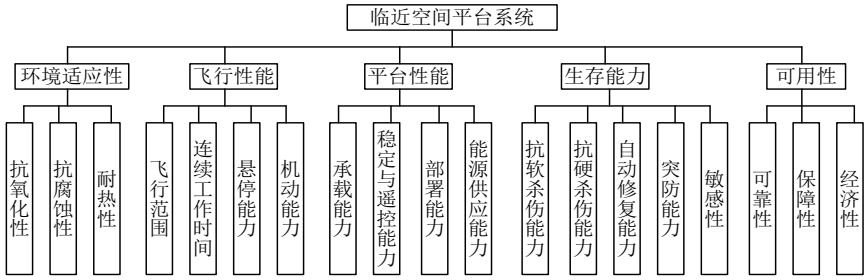


图1　临近空间平台系统效能指标体系

环境适应性是系统适应临近空间强氧化、高辐射等复杂环境的能力，主要包括抗腐蚀、抗氧化和耐热性；飞行性能包括飞行范围（高度、距离）、连续工作时间、悬停能力和机动能力；平台性能是系统提供稳定载荷支撑平台、完成预定任务的能力，包括承载、稳定与遥控、部署和能源供应能力（供应方式和持续时间）；生存能力是临近空间系统在战时或紧急情况时依然能良好工作的能力，包括抗软杀伤、硬杀伤、自动修复、突防能力和敏感性（感知敌方威胁的能力）；可用性主要包括系统可靠性、经济性和保障性（对地面、人员、气象操纵等方面的要求）。

3　改进灰色层次效能评估模型

多层次灰色评价法是以灰色理论为基础，以层次分析、ADC 模型为指导的定量与定性相结合的评估方法，适用于含有不确定信息和信息不完全的复杂系统的效能评估。然而，该方法利用传统 AHP 法构建判断矩阵时由于判断标度不易确定，容易产生不一致性，往往带来复杂的检验修正运算，且 1～9 标度法则在实际应用中评判标准难以准确把握。为了克服这些问题，本文引入新的三标度法则和最优传递矩阵对确定权重的方法进行改进，使判断矩阵能自然满足一致性的要求，省略了一致性检验的复杂运算，克服了 AHP 方法的弊端。

3.1　改进层次分析法求指标权重

3.1.1　构建各层次判断矩阵

图 1 从五个方面构建了临近空间平台系统的效能指标体系结构，文献[3]中应用 1～9 标度法则，在分析指标较多时往往存在判断差异不明显，判断标度不易确定的问题。本文采用-1、0、1 三标度法则构造各层指标成对比较判断矩阵 A，比例法则见表 1。

表 1　三标度比例法则

i，j 两元素重要性对比	a_{ij}	a_{ij}	备注：a_{ij} 表示元素 i 比元素 j 的重要性程度
i，j 两元素重要性相同	0	0	
元素 i 比元素 j 重要	1	-1	

3.1.2　建立最优传递矩阵 R

若存在传递矩阵，且使 $\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(r_{ij}-a_{ij})^2$ 最小，则称 R 为 A 的最优传递矩阵，即 A 是反对称矩阵，且 A 的最优传递矩阵 R 应该满足：

$$r_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_{ik}-a_{jk})=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(a_{ik}+a_{kj}) \quad (1)$$

3.1.3 建立拟传递矩阵 H

若 R 为 A 的最优传递矩阵，则存在矩阵 $H=e^R$，称矩阵 H 为矩阵 A 的一个拟优化传递矩阵，且满足 $h_{ij}=e^{r_{ij}}$。由于拟优化传递矩阵 H 本身为一致阵，自然满足一致性的要求，通过拟优化传递矩阵可以直接获得各指标的权重信息，无需进行一致性检验。

3.1.4 拟传递矩阵求各指标权重

计算拟优化传递矩阵 H 中每一行元素的乘积，通过开 n 次方获得指标权重，最后进行归一化得到最终的指标权重向量 W_i。

3.2 改进灰色效能的临近空间平台评估模型

设被评估对象序号为 s，s=1，2，…，q，$W(s)$为第 s 个系统的综合评价值；专家个数为 p；一级指标 U_i 所组成的集合为$U=\{U_1,U_2,\cdots,U_m\}$；二级指标 V_{ij} 所组成的集合为$V_i=\{V_{i1},V_{i2},\cdots,V_{in}\},i=1,2,\cdots,m$。

3.2.1 计算权重系数

根据图 1 的层次指标体系，利用最优传递矩阵确定权重的方法求得各级指标的相对权重。

3.2.2 建立评分等级标准和评价样本矩阵

通过评分等级对评价指标定量化，根据评价者的评价结果，得第 k 个评价者的评分 d_{ijk}^s，求得其评价矩阵 $D^{(s)}$，即 $D^{(s)}=[d_{ijk}^s]_{(n_1+n_2+\cdots+n_m)\times p}$，其中，$i$=1，2…，$m$；$j$=1，2…，$n$；$k$=1，2…，$p$。

3.2.3 确定评价灰类，计算灰色评价系数

设评估灰类的序号为 e，e=1，2…，g，即共有 g 个灰类，通过各灰类的白化函数，计算灰色评价系数。对于评价指标 V_{ij}，第 s 个受评系统属于第 e 个评价灰类的灰色评价系数 $V_{ijk}^{(s)}$ 的计算公式为：

$$V_{ije}^{(s)}=\sum_{k=1}^{p}f_e(d_{ijk}^{(s)}) \tag{2}$$

第 s 个受评系统属于各评价灰类的总灰色评价数 $x_{ij}^{(s)}$ 为：

$$x_{ij}^{(s)}=\sum_{e=1}^{g}x_{ije}^{(s)} \tag{3}$$

3.2.4 计算灰色评价向量及评价矩阵

所有专家就评价指标 V_{ij}，对第 s 个受评系统主张第 e 个灰类的灰色评价数记为 $r_{ije}^{(s)}$，则有：

$$r_{ije}^{(s)}=\frac{x_{ije}^{(s)}}{x_{ij}^{(s)}} \tag{4}$$

第 s 个受评系统对于评价指标 V_{ij} 的各灰类总评价向量 $r_{ij}^{(s)}=[r_{ij1}^{(s)},r_{ij2}^{(s)},\cdots,r_{ijg}^{(s)}]$。将第 s 个受评系统的 V_i 所属指标 V_{ij} 对各评价灰类的灰色评价向量综合后，可得第 s 个受评系统的 V_i 所属指标 V_{ij} 对于各评价灰类的灰色评价矩阵 $R_i^{(s)}$。

3.2.5 对 V_i、U 进行综合评价，得出评价灰类的灰色评价矩阵

对第 s 个受评系统的 V_i 进行综合评价，其综合评价结果记为 $B_i^{(s)}$，由 $B_i^{(s)}$ 得第 s 个受评者 U 所属指标 U_i 对于各评价灰类的灰色评价矩阵 $R^{(s)}=(B_1^{(s)},B_2^{(s)},$ $,\cdots,B_m^{(s)})^T$。

$$B_i^{(s)}=A_iR_i^{(s)}=(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{in_i})\begin{bmatrix}r_{i11}^{(s)} & r_{i12}^{(s)} & \cdots & r_{i1g}^{(s)}\\ r_{i12}^{(s)} & r_{i22}^{(s)} & \cdots & r_{i2g}^{(s)}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ r_{in_i1}^{(s)} & r_{in_i2}^{(s)} & \cdots & r_{in_ig}^{(s)}\end{bmatrix}=(b_{i1}^{(s)},b_{i2}^{(s)},\cdots,b_{ig}^{(s)}) \tag{5}$$

3.2.6 对第 s 个受评系统的 U 做综合评价，计算综合评估值并进行排序

由各层权重 A 和各评价灰类的灰色评价矩阵得综合评价矩阵：$B^{(s)}=AR^{(s)}=(b_1^{(s)},b_2^{(s)},\cdots,b_g^{(s)})$。将各灰类等级按“灰水平”赋值，得到各个评价灰类等级值化向量 $C=\{d_1,d_2,\cdots,d_g\}$，求得综合评价值 $W^{(s)}=B^{(s)}C^{(s)}$，则根据 $W^{(s)}$ 对被评价系统进行优劣排序。

4 应用实例

根据建立的多层次灰色效能评估方法的步骤，以上述临近空间飞行器的指标体系为例，通过专家咨询意见，运用成对比较法则构造各层次指标判断矩阵。以飞行性能的四个二级指标为例，各类矩阵见表 2。

表 2　飞行性能指标权重矩阵

指标	判断矩阵				最优传递矩阵				拟传递矩阵				权重
	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	h_{21}	h_{22}	h_{23}	h_{24}	
V_{21}	0	1	1	1	0	0.75	1	1.25	1	2.117	2.718	3.49	0.47
V_{22}	−1	0	0	1	−0.75	0	0.25	0.5	0.472	1	1.284	1.649	0.23
V_{23}	−1	0	0	0	−1	−0.25	0	0.25	0.368	0.779	1	1.784	0.17
V_{24}	−1	−1	0	0	−1.25	−0.5	−0.25	0	0.287	0.607	0.779	1	0.13

采用同样的方法分别计算各层指标权重，得到权重向量分别为：$W=(0.1,0.28,0.35,0.15,0.12)$，$W_1=(0.56,0.16,0.28)$，$W_3=(0.38,0.27,0.17,0.18)$，$W_4=(0.2,0.1,0.27,0.27,0.16)$，$W_5=(0.42,0.42,0.16)$。

通过组织 5 位专家按照优劣划分为 7 级。给出 4，3，2，1 分标准，当指标介于两者之间时，相应评分为 3.5，2.5，1.5 分。求出估计样本矩阵 $D^{(1)}$，$D^{(2)}$，$D^{(3)}$，$D^{(4)}$。其中：

$$D^{(1)}=\begin{bmatrix} 3 & 3.5 & 3.5 & 3.5 & 3 & 3.5 & 2.5 & 3 & 3 & 2.5 & 3 & 2.5 & 2 & 3 & 3 & 3.5 & 3.5 & 3.5 & 3 \\ 2.5 & 3 & 4 & 3 & 3.5 & 2.5 & 3 & 3.5 & 2.5 & 3 & 3.5 & 2 & 2.5 & 3.5 & 3 & 3 & 4 & 2.5 & 3.5 \\ 3.5 & 3.5 & 3 & 4 & 2.5 & 3 & 2.5 & 3.5 & 3 & 3.5 & 2.5 & 3.5 & 3.5 & 2.5 & 3.5 & 3.5 & 3.5 & 3 & 3 \\ 2.5 & 4 & 2.5 & 3 & 3 & 3 & 3.5 & 4 & 3.5 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2.5 & 2.5 & 4 & 3.5 & 4 & 3.5 \\ 3 & 3.5 & 3.5 & 3.5 & 3 & 3.5 & 2.5 & 3 & 3 & 2.5 & 2.5 & 3.5 & 2.5 & 3 & 3.5 & 3.5 & 3 & 3.5 & 4 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

设 g=4，确定相应的灰数和白化函数。第一灰类的白化函数为：

$$f_1(d_{ijk}^{(s)})=\begin{cases} d_{ijk}^{(s)}/4 & d_{ijk}^{(s)}\in[0,4] \\ 1 & d_{ijk}^{(s)}\in[4,\infty] \\ 0 & d_{ijk}^{(s)}\notin[0,\infty] \end{cases} \quad (7)$$

分别计算各评价指标的灰色评价权向量、权矩阵，各层指标的综合评价，得到方案 1 临近空间平台系统的综合评价结果 $B^{(1)}=A\cdot R^{(1)}=(0.3787,0.4210,0.2003,0)$，设各评价灰类等级值向量为：$C=(d_1,d_2,d_3,d_4)=(4,3,2,1)$，则方案 1 的综合评价值为：

$$\begin{aligned} W^{(1)} &= B^{(1)}C^T \\ &= (0.3787,0.4210,0.2003,0)(4,3,2,1)^T \\ &= 3.1784 \end{aligned} \quad (8)$$

同理，方案2，3，4的综合评价值为$W^{(2)}=0.29936$，$W^{(3)}=3.1002$，$W^{(4)}=3.0332$。显然，根据综合评价值对四种方案进行优劣排序结果为：$W^{(1)}>W^{(3)}>W^{(4)}>W^{(2)}$，表明方案 1 为最优方案，方案 3 次之，方案 2 最差。

5　结束语

由于临近空间平台系统目前多处于研制和论证阶段，公开的性能参数不多，在评价中存在大量的不确定和不完全信息，而灰色系统理论是解决具有“灰色”信息问题的有效途径。本文从环境适用性、飞行性能、平台性能、生存能力和可用性五个方面建立了较为完整的临近空间平台系统层次指标体系，通过对层次分析法确定指标权重的方法进行改进，结合灰色效能方法评估了平台系统的效能。实例证明，该方法计算简单、结果明确，容易为决策者接受，具有较强的实用性。

参考文献

1　邓友义，南松辉. 基于临近空间平台的反导预警研究[J].飞航导弹，2010(3)：58～60

2　孙悦，郑和鹏. 临近空间应用分析与展望[J]. 信号与信息处理，2008，10(38) ：26～27

3　韩庆元. 基于改进 AHP 的供应商模糊综合评价模型研究[J]. 机械制造，2009(9)：49～251

4　王艳奎. 临近空间飞行器应用前景与发展分析[J]. 国防科技，2009，2(30)：20～24

5　李俊，郝成民，贾仁耀，等. 对临近空间平台的信息对抗问题研究[J]. 导弹与航天运载技术，2008(6)：23～26

6　李延军. 灰色层次分析法在导弹武器系统效能评估中的应用研究[J]. 中国科技信息，2009(21)：29～30

7　李建，王昆. C^4ISR 通信网络系统综合效能评估的灰色层次模型[J]. 舰船电子对抗，2009，5(32)：81～84

8　刘思峰，郭天榜，党耀国，等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京：科学出版社，2000