【基础理论与应用研究】　　doi：10.11809/scbgxb2014.11.037

云理论的临近空间系统效能评估

赵晓东，王俐莉，熊艳晔

（海军指挥学院学院，南京　210016）

摘要：针对在临近空间复杂系统的效能评估过程中存在主观因素对评估结果干扰的问题，根据临近空间系统评估指标的特点，提出了基于云理论的临近空间系统效能评估模型；通过求各指标的云模型表征及各指标参数的权重对临近空间系统效能指标进行了综合评估；实例分析说明云重心评估法对临近空间系统效能评估是科学的、有效的。

关键词：云重心理论；临近空间系统；效能评估

本文引用格式：赵晓东，王俐莉，熊艳晔. 云理论的临近空间系统效能评估[J]. 四川兵工学报，2014(11)：133－136.

中图分类号：E911　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006－0707(2014)11－0133－04

Effectiveness Evaluation of Near Space System Based on Cloud Focus Theory

ZHAO Xiao-dong, WANG Li-li, XIONG Yan-ye

(Navy Command College, Nanjing 210016, China)

Abstract: For questions of subjective factors interference in the performance of near space complex systems evaluation process and according to the characteristics of near space index systems evaluation, proposed near space systems performance analysis model based on cloud theory. Conducted a comprehensive evaluation by seeking the characterize index of cloud model and each of indicator parameter of near space effective evaluation. Through analyzing an example, the accuracy and science of the cloud center of gravity evaluation method are validated in this paper.

Key words: cloud focus theory; near space system; effectiveness evaluation

Citation format: ZHAO Xiao-dong, WANG Li-li, XIONG Yan-ye. Effectiveness Evaluation of Near Space System Based on Cloud Focus Theory[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(11): 133－136.

临近空间介于传统的航空空间之上、外太空空间以下的中间地带，属于航空、航天飞行器绝少能涉足的灰色领域，在空天一体化作战中具有重要的战略意义，是国家战略体系的重要组成部分[1]。西方发达国家已陆续研制出临近空间飞行器，提出临近空间战的相关概念，因此对临近空间的研究比较紧迫。开展临近空间系统效能评估研究，明确临近空间发展方向，对构筑临近空间应用系统意义重大[2]。

目前，我国的临近空间研究尚处于起步阶段，对临近空间系统效能评估研究尚未给出一个完整全面的指标体系；广泛应用于风险评估中的层次分析法在建立判断矩阵时，只是将各单个指标值进行比较[3]，然而，复杂系统中各因素指标之间并不是互相独立的，而是存在一种不确定的关系，本质上就是一种灰色关系。在灰色评估过程中，通过白化权函数可以将聚类对象的实际样本抽象为数量值，但是难以确定白化权函数的具体形式，如果用一条具体的曲线代替，就很难表示灰色系统中信息的不完全性和随机性[4]。

云理论的云重心评估法是一种综合评估法，其能够根据定性分析的判断进行定量分析，将定性定量相结合。本文所提出的基于云理论的临近空间系统效能评估方法为临近空间系统效能综合评估提供了很好的解决途径。与目前的评

收稿日期：2014－04－24

基金项目：“十二五”国防预研基金项目(1011301010101)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20131345)。

作者简介：赵晓东(1970—)，男，博士，副教授，主要从事装备作战运用研究。

估方法相比,云重心效能评估方法具有以下特点:以不确定性为出发点,将主客观信息融合在一起,克服主观性、片面性,使评估结果更加科学、稳定;从全局出发,把模糊性和随机性进行了完全的集成,在保证评判整体性的同时充分考虑到非主要因素对总体可能产生的影响;通过模型中定性指标的定量化表示,提高评估结果的科学化水平。本文首次把云理论对引入到临近空间系统进行效能评估中,运用云重心评判法构建临近空间系统平台能力的效能评估模型,给出系统效能的能力值,为临近空间系统效能分析提供了一种全新的思路。

1 临近空间系统效能评估指标体系的建立

1.1 临近空间系统效能评估指标体系构建的要素分析

从系统论的观点来看,临近空间系统可视为一开放的复杂系统,其涉及的分系统和技术指标较多,用以衡量的指标各异,且划分起来比较笼统、模糊,然而这些指标又是相互联系的有机整体,每个指标都作为要素决定整个系统的整体效能。分析临近空间系统的效能就需要研究这些指标之间的涵盖、隶属关系。依据指标性质、研究维度的不同来分类,可以克服各因素之间关系错综复杂,且相互不独立的弊端。下面就以临近空间系统效能研究为目标,建立临近空间系统效能评估指标体系。

1.2 临近空间系统评估指标体系的建立

在确定临近空间系统的效能指标时,要从临近空间飞行器资源或浮空平台等资源、载荷能力、系统维护能力、系统应用能力、指挥控制能力及环境适应能力等多方面进行综合考量。本文考虑效能指标对其可用性、可信性以及在临近空间环境的影响和制约下完成任务的能力,从整体上对各分系统形成的综合能力进行分析,借助层次分析法简化系统结构,建立的临近空间系统效能评估体系,如图1所示。

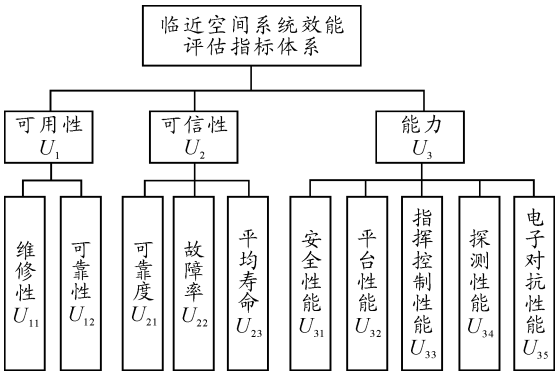

图1 临近空间系统效能层次结构

临近空间系统的效能指标主要从可用性、可信性、能力等3个方面进行评判,此为效能评估的一级指标。可用性指标包括可靠性和维修性;可信性指可靠度、故障率、平均寿命;能力指标涉及到安全性能、平台性能、指挥控制性能、探测控制性能和电子对抗性能。

2 临近空间系统效能的云模型

云理论是源于数据库知识发现的理论,能较好地实现定型概念的定量表示,从而将定性定量有机结合。经过多年的发展,云理论已成为模糊数据挖掘和信息处理的有力工具[5],在系统的效能评估中也得到了广泛应用。

2.1 云模型的概念

一般来讲,概念的不确定性可以用多个数字特征表示,比如期望、方差虽能反映随机性变量的数字特征,但没有触及模糊性;为了表示模糊性,中国工程院院士李德毅基于概率论和模糊理论的有机结合创造性地提出了云模型的理论[6,7]。简单来说,云模型其实就是一种用来进行概念的不确定性转换的模型,该模型基于语言值实现了对定性概念的定量化表示。在云模型中,可以用期望、熵、超熵这三个数字特征刻画定性与定量之间的不确定性转换,为定性与定量相结合的信息处理提供了有力手段与方法。目前,在效能评估中取得了很好的应用效果[8-12]。

设 X 是一个论域 $X=\{x\}$,L 是与 X 相联系的语言值(模糊子集)。对任意元素 x,$x\in X$ 都指定一个数 $\mu_L(x)\in[0,1]$,称为元素 x 对 L 的隶属度。隶属度在论域上的分布称为隶属云,简称云。云由云滴组成,单一的云滴不能反映事物的整体状况,但整体的云能够反映定性概念的重要特性。从云模型发展至今已发展出多种分布形态,但研究最多和应用最为广泛的是正态云。

云的数字特征用期望 E_x、熵 E_n、超熵 H_e 来表示。期望 E_x 可以理解为中心值或理想值,是"云"分布的中心,是最能够代表定性概念的点。熵 E_n 是定性概念模糊程度的度量,其大小反映云滴的离散程度,即亦此亦彼的裕度,同时根据正态分布的"3σ 性"可确定被概念接受的云滴取值范围,因此熵体现了随机性与模糊性之间的关联程度。超熵 H_e 作为熵的不确定性度量,超熵越大,那么云的离散程度越大,则云的厚度也就随之增大。

2.2 基于云模型的评估方法的一般步骤

2.2.1 初始化云模型

关于系统效能评估指标体系的表示,较常见的有数值型表示和语言值描述两种方法,且无论采用哪种表示方法,每个性能指标均可通过一个云模型来表示。

首先提取 n 组相关指标构成决策矩阵,当指标采用数值型表示时,表示如下:

$$E_x=(E_{x1}+E_{x2}+\cdots+E_{xn})/n \tag{1}$$

$$E_n=[\max(E_{x1},E_{x2},\cdots,E_{xn})-\min(E_{x1},E_{x2},\cdots,E_{xn})]/6 \tag{2}$$

当指标采用语言值型表示时,表示如下:

$$E_x=\frac{E_{x1}E_{n1}+E_{x2}E_{n2}+\cdots+E_{xn}E_{nn}}{E_{n1}+E_{n2}+\cdots+E_{nn}} \tag{3}$$

$$E_n=E_{n1}+E_{n2}+\cdots+E_{nn} \tag{4}$$

当指标为数值型值时,各指标的量值可以用 E_{x1},E_{x2},

$\cdots, E_{xn}$来表示；当指标为语言值型时，各指标的期望可以用$E_{x1}, E_{x2}, \cdots, E_{xn}$来表示；各指标云模型的熵可以用$E_{n1}, E_{n2}, \cdots, E_{nn}$来表示。

2.2.2 系统状态的云表示

假设系统由 p 个性能指标来表征，那么其状态就可以用一个 p 维综合云来表示。该 p 维综合云的形状和云重心均随这 p 个性能指标的变化而发生改变。p 维综合云的重心 T 可用 p 维向量表示：

$$T = (T_1, T_2, \cdots, T_p) = a \times b$$

其中 $T_i = a_i \times b_i$，a 为云重心的位置向量，b 为云重心的高度向量，当系统状态发生改变时，其 p 维综合云的重心变为 $T' = (T'_1, T'_2, \cdots, T'_p)$。

2.2.3 计算加权偏离度

在理想状态下，假设 p 维综合云重心位置向量 $a = (E^0x_1, E^0x_2, \cdots, E^0x_p)$，云重心高度向量 $b = (b_1, b_2, \cdots, b_p)$，则理想状态下云重心向量为 $T^0 = a \times b^{\mathrm{T}} = (T_1^0, T_2^0, \cdots, T_p^0)$。对云重心向量进行归一化，得到一组向量：$T^G = (T_1^G, T_2^G, \cdots, T_p^G)$，其中：

$$T_i^G = \begin{cases} (T_i - T_i^0)/T_i^0 & T_i < T_i^0 \\ (T_i - T_i^0)/T_i & T_i \geqslant T_i^0 \end{cases}, \ i = 1, 2, \cdots, p \tag{5}$$

权重偏离度 θ 值的求解可通过将各指标归一化后的权重值 w_i（此处为第 i 个指标归一化后的权重值）与其向量值 T_i 相乘最后求和得到，公式表示如下：

$$\theta = \sum_{i=1}^{p} (w_i T_i^G) \tag{6}$$

其中 $0 < \theta < 1$。

2.2.4 构建云发生器

本文的评语集采用由如下 11 个评语组成的集合：$V = \{v_1, v_2, \cdots, v_p\} = \{V_t | t = 1, 2, \cdots, 11\} = \{$无，非常差，很差，较差，差，一般，好，较好，很好，非常好，极好$\}$将各级评语置于一连续的语言值标尺上，每个评语值均通过云模型来实现，这就构成了一个定性评测云发生器，如果视系统的理想状态为极好，那么 θ 绝对值表示在某一状态下与系统理想状态的接近程度，越小则表示性能越好，反之则越差。

总结以上过程可以用下面的流程图表示效能评估的步骤，如图 2 所示。

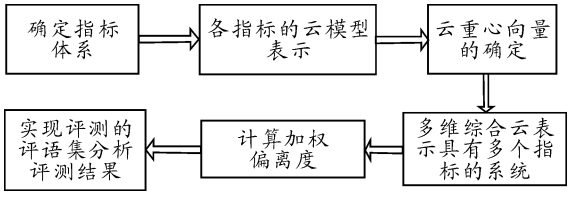

图 2 效能评估一般步骤

3 基于云理论的临近空间系统效能评估法实例分析

本文以临近空间系统平台能力的评估过程为示范，构建基于云理论的临近空间系统效能评估模型，其他指标的评估过程以此类推[7-11]。

3.1 用云模型表示各指标

1）指标参数的确定。根据图 1，由安全性能 U_{31}、平台性能 U_{31}、指挥控制性能 U_{33}、探测性能 U_{34}、电子对抗性能 U_{35}这 5 个指标参数构成临近空间系统评估指标体系的平台能力。

2）指标状态值的确定。指标状态值可邀请相关领域专家评判得出，通过邀请多个专家组成的专家组对临近空间系统平台效能的各项指标进行打分，得到系统的多种状态值。本文抽取能力评判的 5 个指标中的三组数据构成一定时间内系统的状态值并用相应的 3 个数字特征值（E_x, E_n, He）来表示语言值，即用一个云对象来表示。5 个单项指标的定量表示值用 E_x 表示，见表 1。

表 1 各指标状态下的定量表示值

系统状态	U_{31}	U_{32}	U_{33}	U_{34}	U_{35}
1	0.1	0.4	0.4	0.5	0.5
2	0.04	0.5	0.5	0.6	0.5
3	0.07	0.7	0.7	0.5	0.6

3）运用云模型求解各个指标的期望值和熵值。首先，提取其中三组指标的系统状态值，用一个云模型来表示各指标的 3 个系统状态。然后，通过式（1）求得各个指标状态的期望值，通过式（2）求得熵值，见表 2。

表 2 各指标状态下的期望值和熵

指标属性	U_{31}	U_{32}	U_{33}	U_{34}	U_{35}
期望	0.07	0.53	0.5	0.53	0.47
熵	0.008 3	0.05	0.05	0.017	0.017

3.2 各指标权重的确定

常见的用来确定指标权重的方法主要有 Delphi 法、PCA 法、环比法、PC-LINMAP 耦合法和 AHP 法，这些方法的适用情况各不相同[11]，为了尽可能降低人为因素造成的影响，本文按如下式（7）来确定各指标权重：

$$w_i = \begin{cases} \dfrac{1}{2} + \dfrac{\sqrt{-2\ln(\frac{2(i-1)}{n})}}{6} & 1 < i \leqslant \dfrac{n+1}{2} \\ \dfrac{1}{2} - \dfrac{\sqrt{-2\ln(2 - \frac{2(i-1)}{n})}}{6} & \dfrac{n+1}{2} < i \leqslant n \end{cases} \tag{7}$$

其中 $w_1 = 1$，n 为系统指标数，i 为排队等级。将 w_i 归一化处理即可得到权重 w_i^*。根据式（7）可以求得各指标的权重，见表 3。

3.3 五维综合云的重心向量计算

临近空间系统评估指标体系的平台能力中的 5 个性能指标可用 5 个云模型来表示，用一个五维综合云来表示该系统状态。其重心 T 用一个五维向量表示如下：

$$T = (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5)$$
$$T_i = a_i \times b_i, i = 1,2,3,4,5 \quad (8)$$

其中,a 为云重心的位置即期望值,b 为云重心的高度。计算可得五维加权云的重心向量为

$$T = (0.016\,9, 0.108\,0, 0.064\,8, 0.176\,6, 0.043\,0)$$

表3 各指标状态下的权重

指标属性	U_{31}	U_{32}	U_{33}	U_{34}	U_{35}
排队等级	2	3	4	1	5
w_i	0.725 6	0.611 3	0.388 7	1	0.274 4
w_i^*	0.241 9	0.203 8	0.129 6	0.333 3	0.091 5

3.4 计算指标能力值

假设在理想状态下,五维综合云重心位置向量为 $a = (E_{x1}^0, E_{x2}^0, E_{x3}^0, E_{x4}^0, E_{x5}^0)$,云重心高度向量为 $b = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$,那么其云重心向量可表示为 $T^0 = a \times b^{\mathrm{T}} = (T_1^0, T_2^0, T_3^0, T_4^0, T_5^0)$。由于理想状态下各指标值是已知的,可以求得在该状态下加权综合云的重心向量为 $T^0 = (0.006\,4, 0.090\,3, 0.074\,3, 0.102\,3, 0.037\,1)$。此时,关于系统状态和理想状态下五维综合云重心的差异可以通过加权偏离度 θ 来衡量。根据在步骤 2 中给出的式(7)归一化处理后得 $T^G = (0.624\,2, 0.164\,3, -0.127\,4, 0.42\,1, 0.138\,2)$。

由式(6)计算得到加权偏离度 $\theta_3 = 0.320\,9$。

通过式(9),将加权偏离度 θ 转换为指标能力值 θ':

$$\theta' = \begin{cases} 1 + \theta & -1 \leqslant \theta < 0 \\ \theta & 0 \leqslant \theta \leqslant 1 \end{cases} \quad (9)$$

运用云重心评估方法,计算出可用性和可信性的能力值分别为 $\theta'_1 = 0.437\,9$,$\theta'_2 = 0.529\,1$。根据各指标的能力值,计算临近空间系统效能的能力值为 $\theta' = 0.486\,3$,因此,本次效能评估的结果为"介于差与一般之间,倾向于一般",该结果将为下一步的评估提供参考。

4 结束语

本文运用云理论对临近空间系统效能进行评估,该方面的研究还未见相关成果报道。该评估方法的优点在于它是以不确定性作为出发点,综合考虑多种因素对临近空间系统效能可能产生的影响,较好地把主客观信息融合在一起,对模糊性和随机性进行了集成。通过采用云重心评估方法得出临近空间系统效能的语言评价值,避免了用定量数据进行评估产生的不准确问题,最终得出合适的评估结果,拓展了临近空间系统效能分析的思路。本文的分析过程表明:基于云理论的评估方法能够充分考虑多个因素对评估结果的影响,将定性定量相结合,最终给出系统效能的能力值。事实证明,该方法对临近空间系统效能分析的综合评估方便可行。

参考文献:

[1] S CHMIDT D. Dynamic modeling, Control, and station-keeping Guidance of a Large High-Altitude "near - space" airship[J]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2006(9):84 - 85.

[2] 杨德凡,杨维东. 临近空间系统效能分析研究[J]. 装备指挥学院学报,2008,19(3):63 - 67.

[3] 项磊,杨新,张扬,等. 基于层次分析法与模糊理论的卫星效能评估[J]. 计算机仿真,2013,30(2):55 - 61.

[4] 庞敏,张建东,刘明阳. 基于白化权函数聚类法的航电系统效能评估[J]. 计算机仿真,2012,29(4):112 - 115.

[5] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28 - 34.

[6] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):16 - 21.

[7] 刘常昱,李德毅,杜鹢,等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制,2005,34(2):236 - 239.

[8] 冯增辉,张金成,张凯,等. 基于云重心评判的战场态势评估方法[J]. 火力与指挥控制,2011,36(3):13 - 15.

[9] 孟强,徐克虎,李科. 基于云理论的坦克目标价值评估[J]. 兵工自动化,2010,29(12):31 - 33.

[10] 潘潜,周德云,俞吉. 基于云模型的无人机作战系统效能评估[J]. 指挥控制与仿真,2012,34(6):68 - 71.

[11] 吴鹏飞,王大华,薄云蛟. 云理论的飞艇与无人机协同探测效能评估[J]. 火力与指挥控制,2013,38(9):116 - 118.

[12] 杨璐,杨和梅,连广彦. 基于云理论的装甲兵作战体系效能评估[J]. 兵工自动化,2010,29(2):14 - 15.

(责任编辑 周江川)