

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.04.021

一类模糊评价模型与通信卫星效能评估

沈宇飞¹,王轶博¹,矫贺明²,邢宇明²,王 勇²

(1.中国空间技术研究院 通信卫星事业部,100094 北京;2.哈尔滨工业大学 数学系,150001 哈尔滨)

摘 要:为解决通信卫星效能评估问题,提出一类基于模糊理论的评价模型.利用模糊理论的思想,通过对评价对象的性质分析,建立了一个适用于一类评价对象的非线性评价函数.这类对象的每一个评价指标由一系列因素所决定,并且这些因素之间是相互关联的,但任意两个指标之间是相互独立的.利用模糊聚类分析方法,本模型还可以对若干同类型的对象进行分类.最后,基于具体数据,利用本模型给出东方红系列通信卫星的效能评估,东方红3号、4号基本型、4号增强型和5号的评估得分分别为0.230~0.243、0.470~0.536、0.614~0.791和0.855~0.945.评估结果表明,东方红系列通信卫星的整体效能是一直呈上升趋势的,但综合来看东方红5号的整体效能并没有比东方红4号增强型高出过多.

关键词:评价;分类;模糊理论;模糊聚类分析;通信卫星;效能评估

中图分类号: O159; C93; TN927 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)04-0129-04

A class of fuzzy evaluation model and the effectiveness evaluation of telecommunication satellites

SHEN Yufei¹, WANG Yibo¹, JIAO Heming², XING Yuming², WANG Yong²

(1.Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, 100094 Beijing, China;

2.Dept. of Mathematics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: An evaluation model based on fuzzy theory is proposed in order to study the effectiveness evaluation of telecommunication satellites. Using ideas from fuzzy theory, a nonlinear evaluation function is established based on the analysis about properties of the assessment objects, making our model be applicable to a class of assessment objects which are evaluated by a system of index determined by a constellation of factors. These factors may be mutually dependent on each other. However, any two indices are independent. Given a number of such objects, the model is also able to classify them by using the method of fuzzy cluster analysis. Finally, the effectiveness evaluation of telecommunication satellites is considered according to the measurement data. The scores of the telecommunication satellites, Dongfanghong III, the basic and enhanced type of Dongfanghong IV and Dongfanghong V are 0.230–0.243, 0.470–0.536, 0.614–0.791 and 0.855–0.945 respectively, which shows that the effectiveness of Dongfanghong telecommunication satellites are growing. However, the integrated efficiency of Dongfanghong V is not much better than that of the enhanced type of Dongfanghong IV.

Keywords: evaluation; classification; fuzzy theory; fuzzy cluster analysis; telecommunication satellites; effectiveness evaluation

随着通信卫星在军事、商业以及人民的日常生活中越来越广泛的应用,对通信卫星的综合效能评估就显得越来越重要了.针对不同的目的,通信卫星的效能评估方法一般有WSEIAC方法、层次分析法、

灰色模糊分析方法、神经网络方法等^[1-13].这些方法各有其优缺点和适用范围,例如WSEIAC方法的优点是在能够给出模型需要的可用度向量、可信赖矩阵、能力矩阵的情况下,能够对系统做出精确的效能评估,它的缺点是需要大量且准确的统计数据做为基础,推算出模型需要的可用度、可信度和系统能力;层次分析法能够使定性与定量相结合,并且应用广泛,但是相较其他几种效能评估方法,计算量较大;模糊分析法能够对定性的判断进行量化,计算过

收稿日期:2015-11-12.

基金项目:国家自然科学基金(61573120).

作者简介:沈宇飞(1978—),男,高级工程师;
邢宇明(1973—),男,教授,博士生导师;
王 勇(1957—),男,教授,博士生导师.

通信作者:沈宇飞,shenyufei@cast.cn.

程也十分简洁,但它分析的力度比较粗,得到的评估结果不够精确;神经网络方法是具有自主学习与调整能力的效能评估方法且不会出现局部最优解,但其模型的建立颇为复杂,人为提供的训练集的优劣直接影响着模型的效率.

本文的目的是从整体上对通信卫星的综合效能进行评估和把握,特别要考虑当整体效能提高之后,其稳定性的减弱以及造价的上涨所带来的影响.鉴于评估的指标包含许多综合指标,并且所包含的性能无法统一度量,因此本文将借助模糊数学中的一些理论和方法来构建评价模型,类似的思想,还可见于文献[14].由于专家对各指标的评价等级基本一致,所以本文侧重点在模糊隶属函数的构建上,且关键在于隶属函数的选取,相对于传统的隶属函数,本文的隶属函数更符合这类评价对象的性质且具有更好的光滑性.

1 基于模糊理论的评价模型

给定一个评价对象,先对其进行数学上的抽象,设其为 X ,对它的评价有 m 个指标,记为 $x_1, \dots, x_m$, 其中 x_i 又与 n 个指标相关,记为 $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{in})$, $i=1, \dots, m$,通过规范化,不妨设 $0 \leq x_{ij} \leq 1, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$. 因此, X 可以看作一个 $m \times n$ 阶矩阵, $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$. 取论域为 $\Omega = \underbrace{[0, 1] \times \dots \times [0, 1]}_{m \times n}$, 本文的目

标是建立描述 X 的“好坏程度”的模糊集合 $\tilde{G}$ 的隶属函数 $\tilde{G}(\cdot)$. 这里 $\tilde{G}(\cdot)$ 是一个满足 $0 \leq \tilde{G} \leq 1$ 的二阶连续可微函数. 不妨设 X 的“好坏程度”与这些指标正相关,因此, $\tilde{G}$ 满足任意的 x_{ij} , 有

$$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial x_{ij}} > 0. \quad (1)$$

其次,由于当每个指标(因素)提高到一定程度之后,评价对象的稳定性将会随之减弱,并且其造价也会上涨,所以关于每个指标,都存在一个临界值,当其小于这个临界值时,随着指标的提高,其整体评价水平会大幅度提高,因此对这一对象的评价是加速上升的,而当其大于这个临界值时,虽然整体评价水平会继续提高,但由于上述负面因素的影响,本文的评价应当是减速上升的. 这一现象反映到所要构造的隶属函数 $\tilde{G}$ 上,即 $\tilde{G}$ 应当满足其增长率先增大后减小,所以存在 $0 < p_{ij} < 1$, 使得

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \tilde{G}}{\partial x_{ij}^2} > 0, & 0 \leq x_{ij} < p_{ij}; \\ \frac{\partial^2 \tilde{G}}{\partial x_{ij}^2} < 0, & p_{ij} < x_{ij} \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

并且由于任意两个指标是相互独立的,因此 $\tilde{G}$ 满足

$$\frac{\partial^2 \tilde{G}}{\partial x_{ij} \partial x_{kl}} \equiv 0, \quad (i \neq k). \quad (3)$$

综上所述,本文最终的目标是寻找一个满足式

(1)~(3)的评价函数 $\tilde{G}$. 由式(3)可知,为了构造这样的评价函数: 1) 建立每个指标的模糊评价函数 $\tilde{G}_i = \tilde{G}_i(x_i)$, 使其满足式(1), (2) ($\tilde{G}$ 换为 $\tilde{G}_i$); 2) 构造 X 的模糊评价函数 $\tilde{G} = \tilde{G}(\tilde{G}_1, \dots, \tilde{G}_m)$, 使其满足

$$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial \tilde{G}_i} > 0, \quad (4)$$

由上述构造可知

$$\frac{\partial^2 \tilde{G}}{\partial x_{ij}^2} = \frac{\partial^2 \tilde{G}}{\partial \tilde{G}_i^2} \left(\frac{\partial \tilde{G}_i}{\partial x_{ij}} \right)^2 + \frac{\partial \tilde{G}}{\partial \tilde{G}_i} \frac{\partial^2 \tilde{G}_i}{\partial x_{ij}^2}.$$

很显然,这样的 $\tilde{G}$ 不是唯一的,根据奥卡姆剃刀原理,本文希望找到足以描述问题的最简单的函数如下.

1) 固定 $1 \leq i \leq m$, 定义满足条件式(1), (2)的函数 $\tilde{G}_i = \tilde{G}_i(x_i)$. 显然线性函数不能满足要求. 本文策略是将 $\tilde{G}_i$ 写成 $\tilde{G}_i = \sum_{j=1}^n v_j^i \tilde{G}_{ij}$, 其中 $\tilde{G}_{ij}$ 是仅与 x_{ij} 有关的函数, $\{v_j^i\}_{j=1}^n$ 是一个与 i 有关的加权满足 $0 \leq v_j^i \leq 1$ 且 $\sum_{j=1}^n v_j^i = 1$. 对每个固定的 $1 \leq j \leq n$, 来寻求 $\tilde{G}_{ij}$ 的表达式. 本文在 3 次多项式的基础上进行构造, 构造如下:

$$\tilde{G}_{ij}(x_{ij}) = \frac{(3/2)p_{ij}(x_{ij} + 1)^2 - (x_{ij} - p_{ij}/2)^3 - (3/2)p_{ij} - (p_{ij}/2)^3}{(3/2)p_{ij} - (1 - p_{ij}/2)^3 - (3/2)p_{ij} - (p_{ij}/2)^3},$$

显然这样定义的 $\tilde{G}_i$ 满足式(1), (2).

2) 确定 $\tilde{G} = \tilde{G}(\tilde{G}_1, \dots, \tilde{G}_m)$. 选取权重 $\{\mu_i\}_{i=1}^m$ 满足 $0 \leq \mu_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^m \mu_i = 1$, 令

$$\tilde{G} = \tilde{G}(\tilde{G}_1, \dots, \tilde{G}_m) = \sum_{i=1}^m \mu_i \tilde{G}_i,$$

则这样定义的 $\tilde{G}$ 满足式(1)~(3).

设 $X_1, \dots, X_k$ 是 k 个同类型的评价对象且 $X_\alpha = \{x_{ij}^\alpha\}_{m \times n}, 1 \leq \alpha \leq k$, 接下来对其进行分类.

定义 1 定义两个评价对象 X_α, X_β 的综合相关指数为 $r_{\alpha\beta} = 1 - \tilde{G}(|X_\alpha - X_\beta|)$, 其中 $|X_\alpha - X_\beta| = \{|x_{ij}^\alpha - x_{ij}^\beta|\}_{m \times n}$. 定义全部对象 $X_1, \dots, X_k$ 的模糊相似矩阵为 $\tilde{R} = \{r_{\alpha\beta}\}_{k \times k}$.

注意到 $0 \leq r_{\alpha\beta} \leq 1$, 且 $r_{\alpha\beta}$ 越接近 1, X_α, X_β 的相关性越强, $r_{\alpha\beta}$ 越接近 0, X_α, X_β 的相关性越弱.

定理 1 取论域为 $\widetilde{X} = \{X_1, \dots, X_k\}$, 则 $\widetilde{R}$ 是 $\widetilde{X}$ 上的模糊相似关系.

证明 首先, 显然 $\widetilde{R}$ 是对称阵, 从而 $\widetilde{R}$ 满足对称性, 并且, $\forall \alpha, \beta = 1, \dots, k$, 当 $\alpha = \beta$ 时, $r_{\alpha\beta} = 1$, 当 $\alpha \neq \beta$ 时, $r_{\alpha\beta} \geq 0$, 故 $\widetilde{\Delta} \subset \widetilde{R}$, 从而 $\widetilde{R}$ 是自反的, 其中 $\widetilde{\Delta}$ 是 $\widetilde{X} \times \widetilde{X}$ 上的模糊集, 满足

$$\widetilde{\Delta}(X_\alpha, X_\beta) = \begin{cases} 1, & X_\alpha = X_\beta; \\ 0, & X_\alpha \neq X_\beta. \end{cases}$$

即 $\widetilde{\Delta}$ 是 $\widetilde{X}$ 上的恒同关系. 故 $\widetilde{R}$ 是 $\widetilde{X}$ 上模糊相似关系.

设 $t(\widetilde{R}) = \widetilde{R}^k$ 是 $\widetilde{R}$ 的传递闭包, 则 $t(\widetilde{R})$ 是 $\widetilde{X}$ 上的模糊等价关系. 于是本文可以应用模糊聚类分析方法通过模糊等价关系 $t(\widetilde{R})$ 对 $X_1, \dots, X_k$ 进行分类.

2 通信卫星的效能评估

在本文中, 应用模糊理论提出的评价模型, 来建立东方红系列卫星平台通信卫星的效能评估模型.

其指标体系中的特征指标通常包括转发器功率、转发器质量、工作寿命、发射质量、整星输出功率、平台质量和载干比.

率、平台质量、载干比、频率覆盖范围等.

首先, 对这一指标体系做数学上的抽象. 注意到这些指标有的是定量指标, 有的是定性指标, 本文首先要做的是将这些指标量化并且将其量纲一的统一. 简便起见, 将每一因素的最大值设为 1. 令 $x_1, \dots, x_7$ 分别表示转发器功率、转发器质量、工作寿命、发射质量、整星输出功率、平台质量和载干比, 即此模型中的 $m = 7, n = 1$. 由模糊理论评价模型的讨论, 可定义

$$\widetilde{G}(x_1, \dots, x_7) = \sum_{j=1}^7 v_j \widetilde{G}_j(x_j),$$

其中 $v_j > 0, j = 1, \dots, 7$ 是满足 $\sum_{j=1}^7 v_j = 1$ 的常数, $\widetilde{G}_j(x_j)$ 定义为

$$\begin{aligned} \widetilde{G}_j(x_j) = & \frac{(3/2)p_j(x_j + 1)^2 - (x_j - p_j/2)^3 - (3/2)p_j - (p_j/2)^3}{(3/2)p_j - (1 - p_j/2)^3 - (3/2)p_j - (p_j/2)^3}, \end{aligned}$$

这里 $0 < p_j < 1, j = 1, \dots, 7$ 是常数, 确定为每个因素现阶段的平均水平. 本文基于表 1 中东方红系列卫星平台通信卫星各指标的主要参数来构造评价函数进行评价为例. 首先, 由于各指标的单位、评价标准各不相同, 为了进行综合评估, 将其进行统一处理, 使它们在表 1 数据中的最优值为 1, 评估最低值为 0 (保留小数点后 3 位), 见表 2.

表 1 东方红系列卫星平台通信卫星指标参数

评价指标	转发器 功率/W	转发器 质量/kg	工作寿 命/年	发射质 量/kg	整星输出 功率/W	平台质量 (干重)/kg	载干比/%
东方红 3 号	800~1 000	200~230	8	2 320	1 700	960~1 100	20.8~20.9
东方红 4 号 (基本型)	6 000	450~700	15	5 100~5 320	8 000~10 000	1 900~2 200	24.0~31.0
东方红 4 号 (增强型)	8 000~11 000	800~1 000	15	5 500~6 000	14 000~17 000	$\leq 2\,700$	30.0~37.0
东方红 5 号	18 000	1 200~2 200	16	6 500~9 000	20 000	3 600~4 800	33.0~45.0

表 2 归一化处理后的东方红系列卫星平台通信卫星指标参数

评价指标	转发器 功率/W	转发器 质量/kg	工作寿 命/年	发射质 量/kg	整星输出 功率/W	平台质量 (干重)/kg	载干比/%
东方红 3 号	0.044~0.056	0.091~0.105	0.500	0.258	0.085	0.873~1.000	0.462~0.464
东方红 4 号 (基本型)	0.333	0.205~0.318	0.938	0.567~0.591	0.400~0.500	0.436~0.505	0.533~0.689
东方红 4 号 (增强型)	0.444~0.611	0.364~0.455	0.938	0.611~0.667	0.700~0.850	0.356~1.000	0.667~0.822
东方红 5 号	1.000	0.545~1.000	1.000	0.722~1.000	1.000	0.200~0.267	0.733~1.000

根据数据, 取 $p_1 = 0.387, p_2 = 0.352, p_3 = 0.863, p_4 = 0.594, p_5 = 0.561, p_6 = 0.580, p_7 = 0.659$, 则对每个指标, 本文可以得到评价函数 $\widetilde{G}_j, j = 1, \dots, 7$, 例如, $\widetilde{G}_1$ 的函数图像如图 1 所示.

从其图像来看, $\widetilde{G}_1$ 具有良好的光滑性, 并且当

$x_1 < p_1 = 0.387$ 时, 评价函数加速上升 (从数学角度表现为 $\widetilde{G}_1$ 是凸函数), 当 $x_1 \geq p_1$ 时, 评价函数减速上升 (从数学角度表现为 $\widetilde{G}_1$ 是凹函数). 这样本文的评价函数就反映了随着指标的增长, 其评价连续光滑地上升; 在临界点 p_j 之下, 本文的评价加速上升, 而在

临界点之上时,随着性能的提高,相应的不稳定性
和高造价等负面影响就随之而来,因而是减速上升的.
因此,本文所取的评价函数是科学、合理的.对于各
指标,本文评价见表 3.

选取一组权重(权重的选取可依据专家打分方
式获得),例如,取 $v_1 = \frac{2}{7}, v_2 = v_4 = v_6 = \frac{1}{14}, v_3 = v_7 = \frac{1}{7},$
 $v_5 = \frac{3}{14}$,可以得到对东方红系列卫星平台通信卫星的
一组综合评价,见表 4.

表 3 东方红系列通信卫星各指标的评价

指标	$\tilde{G}_1$	$\tilde{G}_2$	$\tilde{G}_3$	$\tilde{G}_4$	$\tilde{G}_5$	$\tilde{G}_6$	$\tilde{G}_7$
3 号	0.040~0.051	0.094~0.110	0.425	0.214	0.063	0.880~1.000	0.413~0.415
4 号基本型	0.365	0.229~0.374	0.928	0.544~0.571	0.368~0.479	0.402~0.479	0.491~0.666
4 号增强型	0.502~0.700	0.434~0.552	0.928	0.593~0.656	0.702~0.860	0.316~1.000	0.641~0.813
5 号	1.000	0.664~1.000	1.000	0.717~1.000	1.000	0.161~0.225	0.715~1.000

表 4 东方红系列通信卫星的综合评价

指标	3 号	4 号基本型	4 号增强型	5 号
$\tilde{G}$	0.230~0.243	0.470~0.536	0.614~0.791	0.855~0.945

这样,本文就从定量的角度对东方红系列卫星
平台通信卫星进行了综合的评估.从评估结果来看,
东方红系列通信卫星的整体效能是一直呈上升趋势
的,但综合来看,东方红 5 号的整体效能并没有比东
方红 4 号增强型高出太多.

从上述讨论可以看出,相比于其他的评估模型,
本模型的计算比较简洁.注意到本文中所构造的是
一个 S 型隶属函数,在传统方法中,S 型模糊隶属函
数通常构造为由两个二次函数构成的分段连续但不
光滑函数(见文献[15]).与传统方法相比,本文的
隶属函数不但连续,并且是光滑的,因此更符合评估
中“循序渐进”的特性.

3 结 论

1)应用模糊数学理论的思想建立了一类适用
于某些特定性质的对象的评价模型.通过对这类对
象的性质的分析,给出了一个非线性的模糊隶属函
数来描述其评估.与传统的隶属函数相比,这一隶属
函数有更好的光滑性.

2)将这类模型应用于通信卫星的效能评估上,
基于具体数据给出了具体的评价函数,从而得到东
方红系列通信卫星的效能评估.

参考文献

[1] 安雪滢,赵勇,杨乐平,等. 基于模糊理论的卫星系统效
能评估仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8):
2334~2337.

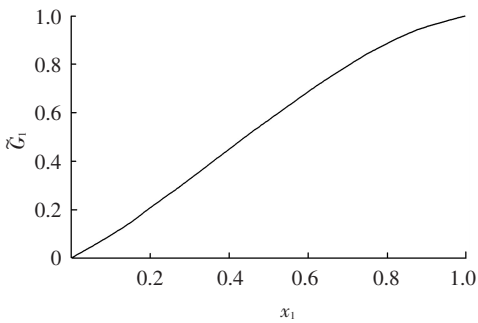


图 1 $\tilde{G}_1$ 的函数图像

[2] 冯书兴,肖业伦,陈浩光. 基于模糊推理的卫星系统综合
效能评估方法[J]. 中国空间科学技术, 2003, 23(1):
31~37.

[3] 杨军. 基于模糊理论的卫星导航系统综合效能评估研究
[J]. 宇航学报, 2004, 25(2): 147~151, 194.

[4] 胥伟,徐慨,钟帅. 基于 AHP 灰色效能法的同步轨道通
信卫星综合能力评估[J]. 船电技术, 2012, 32(11):
13~15, 18.

[5] 曹加勇. 基于 TOPSIS 的同步轨道通信卫星综合能力评
估[J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(1): 61~63.

[6] 尹江丽,王莉. 军用卫星通信系统效能评估指标体系研
究[J]. 兵工自动化, 2008, 27(6): 9~11.

[7] 王力,刘家琦. 假设检验在 AHP 及卫星方案优选中的应
用[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(12): 49~52.

[8] 毛晓芳,岳晓蕊,傅惠民. 通信卫星推力器可靠性评估方
法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2475~2479.

[9] 黄小钰,李智. 基于 MAS 的通信卫星系统整体效能评估
方法[J]. 装备指挥技术学院学报, 2012, 23(1): 89~93.

[10] 杨巧丽,叶淦华,陆锐敏. 基于模糊理论的星座通信系
统性能综合评估[J]. 无线电通信技术, 2009, 35(3):
8~10.

[11] 杨柳,张宁. 卫星话音通信网运行质量指标体系研究与
评估[J]. 通信技术, 2014, 47(3): 286~289.

[12] 刘旭光,孔德强,李浩,等. 一种卫星通信系统效能评估
方法研究[J]. 航天电子对抗, 2012, 28(5): 30~33, 52.

[13] 陈浩光,李云芝,孙磊. 基于模糊推理的武器系统效能
评估新方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2004, 18(4):
63~68.

[14] 吴际,矫贺明,石春生. 基于模糊理论的 R&D 员工创新
绩效评价模型[J]. 管理学报, 2011, 8(5): 734~738.

[15] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 3 版. 武
汉:华中科技大学出版社, 2006: 1~89.