

# 基于分层模糊决策的航天电子产品 模块寻优评价方法

解宝辉, 吕 坤, 李 妍, 薛瑞丽

(山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264670)

**摘要:** 针对航天电子产品模块多方案选择, 提出了基于分层模糊决策的方案量化寻优评价方法; 建立了分层寻优评价模型, 并提出了技术指标、产品化指标和经济指标等多维度寻优评价指标、确定了各指标的寻优方向; 针对航天产品评价指标不易量化的特点, 采用量化计算和专家评价方式统计数据; 结合航天产品关注重点分配评价指标不同权重, 突出经济性、通用性等指标; 应用该方法对工程中功能模块多方案量化寻优评价的结果与实际工程选择一致, 该评价方法应用简单、结果清晰, 符合认识、理解的过程, 是一种有效的快速评价方法。

**关键词:** 航天产品; 模块寻优; 模糊决策分析; 评价指标; 指标权重

## Optimal Evaluation Method for Aerospace Electronic Modular Products Based on the Multi-layer Fuzzy Decision Analysis

XIE Baohui, LÜ Kun, LI Yan, XUE Ruili

(Shandong Institute of Space Electronic Technology, Yantai 264670, China)

**Abstract:** Aiming at the multiple projects' selection of aerospace electronic modular products, a quantitative optimal evaluation method based on multi-layer fuzzy decision analysis is presented. A multi-layer optimal evaluation model is established. The multi-rank factors such as techniques, productization and economics are introduced, and their optimal aspects are determined. As evaluation factors of aerospace products are not easy to be quantified, both quantitative calculation and expert evaluation are taken into consideration for statistics. The weights of evaluation factors are allocated according to the focus of aerospace products, and economic and universal factors are highlighted. Through a case study, the method has successfully carried out quantitative optimal evaluation on multiple projects of functional modules, the result is consistent with the aerospace project selection. The evaluation method is simple, the result is distinct, and it conforms to the process of cognition. It is an effective and rapid evaluation method.

**Keywords:** aerospace products; modular optimization; fuzzy decision analysis; multi-rank factors set; weights

## 0 引言

航天产品是指航天系统开发、研制或生产过程形成的硬件或软件。按其组成的复杂程度分为系统、分系统、单机、模块 4 个层次<sup>[1]</sup>。

模块化是在对系统进行清晰的层次化分解的基础上, 进行封装和抽象, 使系统最终由一系列具有特定功能和通用接口的独立的模块组成<sup>[2]</sup>。模块化主要是面向设计, 注重产品结构的集成、优化、重组, 进而实现模块功能的独立、简化、完善和创新<sup>[3]</sup>。

随着我国航天科技工业快速发展, 型号产品研制和批生产数量大幅增加、转型升级不断加快、竞争愈加激烈, 航天型号产品的产业化发展必将成为航天未来高速发展的必由之路。在现有航天型号科研工程的基础上, 实施航天

产品工程的研究与实践, 确定待研新产品的具体规格和技术指标, 从而为新技术研发指引方向, 有效促进产品更新换代研究和应用, 为型号持续提供所需的优质产品<sup>[4]</sup>。

航天产品属于典型的复杂产品, 具有高可靠、高质量要求的特点, 涉及电路、结构、工艺等多个方面, 在产业化、模块化、低成本等发展背景下, 研制通用性强、质量稳定的货架式模块化产品成为发展的必然, 如何衡量、评价模块优劣, 确定新产品的具体规格和技术指标成为各方关注的焦点。同时, 需要解决采用哪些评价指标、不易量化的指标如何处理等问题。

## 1 模糊决策与欧氏距离

1965 年, 美国人 L. A. Zadeh 教授提出的开创性论文模糊集合<sup>[5]</sup>, 并由此发展为一门新的数学分支学科模糊数学。

收稿日期: 2023-02-02; 修回日期: 2023-03-12。

作者简介: 解宝辉(1979-), 男, 山东烟台人, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天测控通信方向的研究。

引用格式: 解宝辉, 吕 坤, 李 妍, 等. 基于分层模糊决策的航天电子产品模块寻优评价方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(8): 287-292.

模糊数学是研究和处理模糊性现象的一种数学理论和方 法。采用模糊集的描述方式，运用模糊性概念进行判断、评价、决策和控制的过程也可以用模糊性数学的方式来描述。模糊性系统理论构成了一种思辨数学的雏形，已经在气象、经济管理、工业、教育等方面取得了具体的研究应用成果。

模糊决策是指在模糊环境下进行决策的数学理论和方 法。陈守煜教授提出求解模糊模式识别问题是：已知若干个模式或标准样本，识别与计算研究对象属于各个模式的相对隶属度，计算相对状态（或级别）特征值，识别判断研究对象属于哪个模式或标准样本<sup>[6]</sup>。

文献 [7-10] 对模糊决策的一些典型决策模型进行了数学论证及工程应用论述。文献 [7] 提出了在模糊决策分析中采用模糊集合理论进行模型化决策分析的方法。文献 [8] 对模糊决策应用中的模糊划分进行了论证分析。文献 [9] 针对竞标决策应用，从期望的利润、生产力提高和长期增长等方面进行了模糊决策分析。文献 [10] 提出了一种基于智能模糊决策树算法 HEMTM 的分层英语机器翻译方法，通过捕获和分析相应的分层英语机器翻译中相关特征来实现建模。

欧氏距离是一个通常采用的距离定义，指在  $n$  维空间中两个点之间的真实距离。参考文献 [11-12] 欧氏距离公式如下：

$$d_n(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

文献 [13] 采用加权欧氏距离方法对湟水河监测断面的水质进行综合评价，进行了欧氏距离的应用实践。

## 2 航天电子产品分层模糊决策模块寻优评价方法

航天电子产品功能模块在不同型号应用时，其具体需求不同，同一种标准功能模块具体的供电能力、采集能力、传输通道数量等性能需求会有差异，从而形成不同的标准功能模块方案。根据航天电子产品特点，采用基于分层模糊决策的航天电子产品模块寻优方法，从模块化标准功能模块的多种设计方案中优选出最佳的设计方案，实现模块化标准功能模块的优化，形成通用的货架式标准功能模块。

如图 1 所示，基于分层模糊决策的航天电子产品模块寻优方法如下：

### Step 1: 确认基本功能单元性能指标

根据模块化标准功能模块所对应的最基本功能单元，对不同型号该最基本功能单元所对应的性能指标进行统计分析，得出最基本功能单元的性能指标。

### Step 2: 建立模块多个设计方案

根据最基本功能单元的性能指标，获得该最基本功能单元所对应的模块化标准功能模块的多个设计方案。

### Step 3: 构建模块寻优评价指标

从航天产品应用特性和模块产品特点出发，构建功能模块寻优评价指标，确定寻优方向。

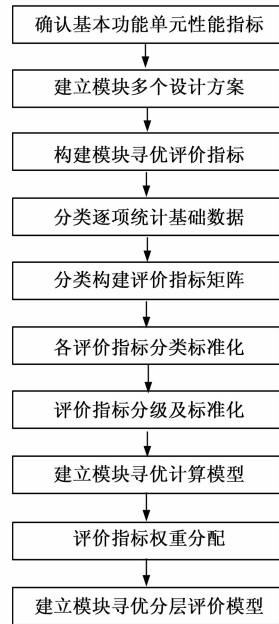


图 1 航天电子产品模块寻优评价方法流程图

建立如下 2 级 3 类 7 项评价指标：技术指标（设计复杂度、可靠性、工艺性、测试性）、产品化指标（通用性、安装空间）和经济性指标（经济性（研制成本））。

参考文献 [14-15] 形式，根据航天产品特点，构建寻优评价指标矩阵，如表 1 所示。

表 1 寻优评价指标和寻优方向

序号	寻优评价指标		寻优方向
1	技术指标 (A 类)	设计复杂度	设计越简单,设计方案越好
2		可靠性	可靠性越高,设计方案越好
3		工艺性	工艺要求越低,设计方案越好
4		测试性	测试方案越简单,设计方案越好
5	产品化指标 (B 类)	通用性	通用性越高,设计方案越好
6		安装空间	安装空间越小,设计方案越好
7	经济指标 (C 类)	经济性 (研制成本)	研制成本越低,设计方案越好

备注:评价指标可以根据不同模块情况进行调整。

### Step 4: 分类逐项统计基础数据

根据各项寻优评价指标特点，采用量化计算和专家评价相结合方式进行基础数据统计。

对可以量化的评价指标，如可靠性、安装空间、经济性等，进行量化计算。

对于设计复杂度、通用性、工艺性、测试性等，进行方案间专家评价对比，得到各设计方案在寻优评价指标下的评价指标值。

### Step 5: 分类构建评价指标矩阵

参考文献 [16-17]，构建评价指标矩阵  $X_{m \times n}$ 。

设  $X$  为  $m$  个方案组成的样本集合，每个方案有  $n$  项评价指标，分类建立实测指标矩阵。

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (2)$$

Step 6: 各评价指标分类标准化

由于每种指标的取值范围差异很大, 在计算前需要对各个指标值进行标准化, 将矩阵  $\mathbf{X}$  变为指标特征值规格化矩阵。

$$\mathbf{R}_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (3)$$

参考文献 [18], 对于不同的评价指标, 其标准化转换公式不同:

1) 对于指标数值越小, 方案越优的指标 (设计复杂度、安装空间、经济性、工艺性和测试性), 标准化转换公式为:

$$r_{ij} = \frac{b_j^+ - x_{ij}}{b_j^+ - b_j^-} \quad (4)$$

其中:  $b_j^-$  表示第  $j$  种指标在  $i$  种方案中的最小值,  $b_j^+$  表示第  $j$  种指标在  $i$  种方案中的最大值。

2) 对于指标数值越大, 方案越优的指标 (可靠性和通用性), 标准化转换公式为:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - b_j^-}{b_j^+ - b_j^-} \quad (5)$$

Step 7: 评价指标分级及标准化

$n$  个指标按照  $C$  个级别的指标标准特征值进行识别, 建立指标级别标准特征值矩阵。

$$\mathbf{Y}_{n \times c} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1c} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nc} \end{bmatrix} = (y_{jh}) \quad (6)$$

按照“优、良、中、可、差”5 个等级, 对 7 个指标按照 3 类分别进行指标标准特征值识别, 依次定义为“5、4、3、2、1”。

按照线性变化确定指标级别标准特征值标准化矩阵。

$$\mathbf{S}_{n \times c} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1c} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n2} & \cdots & s_{nc} \end{bmatrix} = (s_{jh}) \quad (7)$$

Step 8: 建立模块寻优计算模型

参考文献 [6]、[19], 基于欧氏距离方案  $i$  与级别  $h$  间的差异表示为:

$$d_{hi} = \sqrt{\sum_{j=1}^n [\omega_j (r_{ji} - s_{jh})]^2} \quad (8)$$

$$D_{hi} = u_{hi} d_{hi} = u_{hi} \sqrt{\sum_{j=1}^n [\omega_j (r_{ji} - s_{jh})]^2} \quad (9)$$

$\omega_j$  为不同指标的加权系数。

以方案  $i$  对于级别  $h$  的加权欧氏距离平方和最小建立目标:

$$\min \{ F(u_{hi}) = \sum_{h=1}^c D_{hi}^2 \} \quad (10)$$

则  $m$  个方案, 依据  $n$  项指标, 按照  $c$  个级别计算的相对隶属度为:

$$u_{hi} = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n [(\omega_j (r_{ji} - s_{jh}))^2]}{\sum_{j=1}^n [(\omega_j (r_{ji} - s_{jk}))^2]} \right\}}, & d_{hi} \neq 0 \\ 1, & d_{hi} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其相对隶属度矩阵为:

$$\mathbf{U}_{c \times m} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1m} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{c1} & u_{c2} & \cdots & u_{cm} \end{bmatrix} = (u_{hi}) \quad (12)$$

则方案  $i$  的级别特征值为:

$$H_i = \sum_{h=1}^c h u_{hi} \quad (13)$$

Step 9: 评价指标权重分配

根据每个寻优评价指标的重要性不同, 分配不同的加权系数。

在航天电子产品中, 考虑到产品为飞行产品、以及近年关注产品化发展、低成本研制等情况, 因此重点关注设计复杂度、通用性、安装空间、经济性等方面, 权重设为 2.0, 其余可靠性、工艺性、测试性等方面的权重设为 1.0。在技术、产品化、经济三类指标中, 基于航天产品产业化发展, 重点考虑产品化指标, 权重设为 2.0, 其余的技术指标、经济指标等方面的权重设为 1.0, 如表 2 所示。

表 2 寻优评价指标权重

1	权重	设计复杂度	可靠性	工艺性	测试性	通用性	安装空间	经济性
	$\omega_{1j}$	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0
2	权重	技术指标 (A 类)			产品化指标 (B 类)		经济指标 (C 类)	
	$\omega_{2j}$	1.0			2.0		1.0	

参考文献 [20], 指标权重归一化:

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \quad (14)$$

Step 10: 建立模块寻优分层评价模型

对每个方案的技术指标、产品化指标、经济指标等三类指标分类各自按照 Step 3~Step 9 进行分析层计算。

首先, 计算每个方案技术指标 (A 类) 的寻优评价级别特征值  $H_A$ , 其中级别特征值最大的方案技术指标最优。

然后, 计算每个方案产品化指标 (B 类) 的寻优评价级别特征值  $H_B$ , 其中级别特征值最大的方案产品化指标

最优。

最后，计算每个方案经济指标（C类）的寻优评价级别特征值 HC，其中级别特征值最大的方案经济指标最优。

将三类指标级别特征值作为目标层计算的样本，再按照 Step 3~Step 9 进行目标层计算，得到航天电子产品模块多个方案的寻优评价级别特征值 H。

参考文献 [16]、[21] 形式，根据航天产品应用特点，构建航天电子产品模块寻优分层评价模型，如图 2 所示。

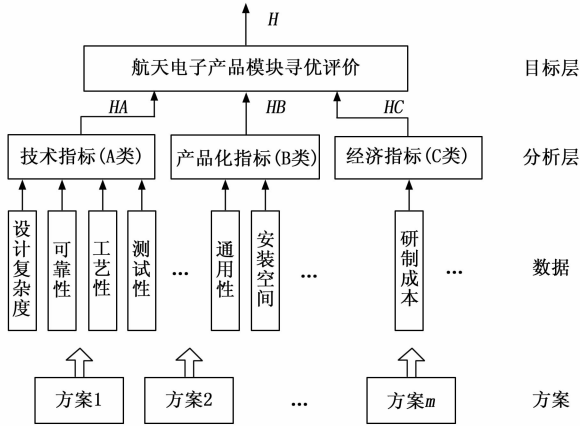


图 2 航天电子产品模块寻优分层评价模型图

模糊决策寻优评价结果 H 中级别特征值最大为最优，其对应的设计方案即为该模块化标准功能模块的最优设计方案，所述模块化标准功能模块按照最优设计方案进行设计，形成通用的货架式标准功能模块。

### 3 航天电子产品某电源模块方案寻优评价实例

本文以电源模块进行基于模糊决策的航天电子产品模块寻优评价方法实例分析。

针对某航天产品电源模块，实现将 28 V 供电转换为低压，供内部各功能模块使用。确认基本功能单元性能指标：“①28 V 输入；②输出+5 V、+15 V、-15 V 供内部功能模块使用”等。

根据最基本功能单元（电源模块）性能指标，建立模块多个设计方案，如表 3 所示。

电源模块各方案差异核心为供电输出能力（输出功率）。

逐项统计基础数据如表 4 所示。

对可以量化的评价指标，如可靠性、安装空间、经济性

表 3 电源模块的不同设计方案

序号	分类	方案核心	备注
1	方案 I	15 W 内部电源转换、匹配滤波器、外围电路等	
2	方案 II	30 W 内部电源转换、匹配滤波器、外围电路等	
3	方案 III	65 W 内部电源转换、匹配滤波器、外围电路等	

等分别进行 3 个方案的可靠性、安装空间和研制成本的量化计算，数据见表 4。

对于设计复杂度、通用性、工艺性、测试性等进行方案间对比，采用专家评价方式给出统计数据。3 个方案工艺性、测试性基本相同，评价结果均为 1.0；设计复杂程度基本类似，随着功率增加，方案复杂度略有增加，以方案 I 为基本参考 1.0，方案 II 对比评价为 1.1，方案 III 对比评价为 1.2。由于 3 个方案通用性差异较大：方案 I 功率小，带载能力稍差，无法适用整机中模块较多（例如 8 个模块 20 W）或者存在大功率模块应用情况；方案 II 功率适中，带载能力适用性较好；方案 III 功率较大，带载能力很强，对于单机模块数量较少（例如 3 个模块 5 W）的情况，存在较多功率浪费；以方案 I 为基本参考 1.0，根据评估，方案 II 为 2.0、方案 III 为 1.0。

根据表 4 中 3 种方案 7 项寻优评价指标，分类进行计算。

首先，对技术指标（A 类）的设计复杂度、可靠性、工艺性、测试性等 4 项寻优评价指标，按照 Step 5~Step 9 进行计算，评价 3 种方案技术指标（A 类）的优劣。

因此， $m=3, n=4$ 。

根据公式（2），建立技术指标（A 类）评价指标矩阵如下：

$$XA_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0.99994382 & 1 & 1 \\ 1.1 & 0.99992843 & 1 & 1 \\ 1.2 & 0.99991472 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

根据式（3）~（5），计算技术指标（A 类）指标特征值规格化矩阵如下：

$$RA_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 0.50 & 0.47 & 1.00 & 1.00 \\ 0 & 0 & 1.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

表 4 3 个设计方案评价指标统计数据

序号	方案	技术指标(A类)				产品化指标(B类)		经济指标(C类)
		设计复杂度	可靠性( $\times 10^{-6}$ )	工艺性	测试性	通用性	安装空间( $\text{mm}^3$ )	经济性(万元)
1	方案 I	1.0	0.999 943 82	1.0	1.0	1.0	150 000	4.9
2	方案 II	1.1	0.999 928 43	1.0	1.0	2.0	165 000	5.5
3	方案 III	1.2	0.999 914 72	1.0	1.0	1.0	253 500	6.75

按照“优、良、中、可、差”5个等级进行识别, 因此  $c=5$ 。

根据公式(6), 建立技术指标(A类)评价指标分级矩阵如下:

$$Y_{A_{4 \times 5}} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix}$$

根据公式(7), 线性变化确定技术指标(A类)评价指标级别标准特征值标准化矩阵如下:

$$S_{A_{4 \times 5}} = \begin{bmatrix} 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.75 & 1 \end{bmatrix}$$

根据表2, 明确技术指标(A类)4项指标(设计复杂度、可靠性、工艺性、测试性)各指标权重如下:

$$W_{A_4} = [2 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

根据公式(14), 技术指标(A类)各指标权重归一化:

$$\omega_{A_4} = [0.4 \quad 0.2 \quad 0.2 \quad 0.2]$$

按照 Step 8, 根据公式(8)~(12), 计算3个方案的4项技术指标按照5个级别计算的相对隶属度矩阵如下:

$$U_{A_{5 \times 3}} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0517 & 0.2167 \\ 0 & 0.1171 & 0.3015 \\ 0 & 0.3328 & 0.2476 \\ 0 & 0.3681 & 0.1475 \\ 1.0000 & 0.1303 & 0.0867 \end{bmatrix}$$

根据公式(13), 3个方案的技术指标级别特征值为:

$$H_A = [5.0000 \quad 3.4081 \quad 2.5860]$$

计算表明, 第一个方案的级别特征值(5.0000)最大, 其技术指标最优。

然后, 对产品化指标(B类)的通用性、安装空间等2项寻优评价指标, 按照 Step 5~Step 9 进行计算, 评价3种方案产品化指标(B类)的优劣。

经计算, 3个方案的产品化指标级别特征值  $H_B$  为:

$$H_B = [3.0000 \quad 4.6267 \quad 1.0000]$$

计算表明, 第二个方案的级别特征值(4.6267)最大, 其产品化指标最优。

最后, 对经济指标(C类)的经济性等寻优评价指标, 按照 Step 5~Step 9 进行计算, 评价3种方案经济指标(C类)的优劣。

经计算, 3个方案的经济性指标级别特征值  $H_C$  为:

$$H_C = [5.0000 \quad 3.8244 \quad 1.0000]$$

计算表明, 第一个方案的级别特征值(5.0000)最大, 其经济性指标最优。

以技术指标  $H_A$ 、产品化指标  $H_B$ 、经济指标  $H_C$  等3类指标级别特征值为样本建立3个方案的分析层样本数据:

因此,  $m=3, n=3$ 。

$$X_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 5.0000 & 3.4081 & 2.5860 \\ 3.0000 & 4.6267 & 1.0000 \\ 5.0000 & 3.8244 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

按照 Step5~Step9 进行计算, 评价3种方案技术指标的优劣。

经过目标层计算:

$$H = [3.6125 \quad 3.9183 \quad 1.0000]$$

显然第二个方案的级别特征值(3.9183)最大, 因此第二个设计方案最优(综合技术指标、产品化指标、经济指标三类指标), 为该模块化标准功能模块的最优设计方案。

## 4 系统应用

本文基于模糊决策和加权标准化欧氏距离的数学方法, 通过模糊数学处理评价对象, 实现航天电子产品模块多方案量化寻优评价。

在某电源模块方案寻优评价施例中, 根据模糊决策寻优的结果  $H$ , 第二个方案的级别特征值(3.9183)最大, 第二个设计方案最优。此结果与常规认识里方案 I 最优(设计最简单、安装空间最小、价格最便宜)不一致, 下文进一步分析计算结果。

根据技术指标(A类)的模糊决策寻优结果  $H_A$ , 第一个方案的级别特征值(5.0000)最大, 因此第一个设计方案的技术指标最优。

根据产品化指标(B类)的模糊决策寻优结果  $H_B$ , 第二个方案的级别特征值(4.6267)最大, 因此第二个设计方案的产品化指标最优。

根据经济性指标(C类)的模糊决策寻优结果  $H_C$ , 第一个方案的级别特征值(5.0000)最大, 因此第一个设计方案的经济指标最优。

在应用实例中, 方案 I 技术指标最优、经济指标最优, 符合常规认识; 方案 II 的产品化指标最优; 综合技术指标、产品化指标、经济指标三类指标后的模糊决策寻优结果  $H$  表明: 方案 II 综合较优。在叠加产品化指标后, 模糊决策寻优的结果中第二个方案的级别特征值(3.9183)最大、第一个方案的级别特征值(3.6125)其次, 因此方案 II 最优, 作为该模块化标准功能模块的最优设计方案, 在此基础上展开工程设计, 形成通用的货架式标准功能模块。

采用分层模糊决策方式, 不仅呈现模块寻优的最终结果, 而且很好地展现了技术指标、产品化指标、经济指标等层次指标情况。在某电源模块方案寻优评价施例中, 方案 II 最优的模糊决策寻优结果充分综合了多方面指标, 尤其体现了目前航天产品产品化发展的趋势, 满足新产品的具体规格和技术指标设计需求, 也与实际工程中的选择一致, 更加符合认识、理解的过程, 评价结果更加客观、可

信, 评价方法应用简单、结果清晰, 是一种有效、可靠的快速评价方法。

针对航天电子产品模块寻优评价, 提出了技术指标(设计复杂度、可靠性、工艺性、测试性)、产品化指标(通用性、安装空间)和经济指标(研制成本)2级3类7项评价指标并确定了寻优方向, 建立了航天电子产品模块化标准功能模块的优选评价指标体系, 可以从多维度有效评价模块方案。

针对不同类别模块, 可以根据不同应用环境调整相关寻优评价指标、增加或减少评价维度, 当维度越多其评价涵义越丰富。在本文施例中, 方案简单、相近, 工艺性、测试性等参量基本相同, 本方法用于复杂模块时, 相关参量的意义更明显。本方法同样适用于系统、单机层面寻优评价。

针对航天产品关注重点, 进行不同评价指标权重分配, 重点关注考虑设计复杂度、通用性、安装空间、经济性等方面。权重系数可以根据产品、模块应用环境不同等方面进行调整, 例如: 近年关注通用化和低成本研制, 可以分配较高权重。

针对航天产品评价指标不易量化的特点, 采用量化计算和专家评价相结合的方式, 将难以量化考核的寻优评价指标转化为实测指标, 实现了寻优评价指标量化统计。

模糊计算过程中, 利用 Matlab 等工具可以有效简化矩阵计算工作量、较快获得评价结果。

采用分层架构计算时, 如果评价数据样本较少, 需要按照公式关注计算过程边界值处理。

## 5 结束语

本文提出的基于分层模糊决策航天电子产品模块寻优评价方法, 为多方案择优评价提供了数据支撑依据。根据航天电子产品特点提出了2级3类7项评价指标数据、实施了不同权重分配, 采用量化计算和专家评价方式统计数据解决了航天产品模块寻优评价不易量化的问题。通过分层模糊决策方式将评价信息进行模糊数学计算, 分层架构清楚、指标展现客观、易于理解, 从而得出比较科学、贴近实际的量化评价。通过工程实例计算表明, 该寻优评价方法合理、可行, 与实际工程中的选择一致, 是一种可信、实用的航天电子产品模块寻优评价方法。

### 参考文献:

- [1] 袁家军. 航天产品工程 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [2] 邓恒, 蒋毅, 鲍福廷. 导弹武器模块化设计与生产 [J]. 火箭推进, 2004, 30 (6): 36-41.
- [3] 王雪梅, 胡元威. 浅谈模块化思路下航天产品的创新着眼点 [J]. 航天工业管理, 2018 (5): 45-47.
- [4] 庄国京, 杜刚, 韩天龙. 航天产品工程实践的思考 [J]. 质量与可靠性, 2016 (2): 11-14.
- [5] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965

(8): 338-353.

- [6] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [7] STEPHEN R W, JONATHAN J W, MICHAEL L D. Fuzzy decision analysis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1979 (1): 1-9.
- [8] KIMIYAKI S, SHUYA K, TAKENOBU T, et al. Decision analysis of fuzzy partition tree applying AIC and fuzzy decision [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5179 (1): 572-579.
- [9] LI L, LI H B, NIE N X. Fuzzy set based analysis on bidding decision [C] // Beijing: International Conference on Management and Service Science, MASS, 2009: 1-4.
- [10] 陶媛媛, 陶丹. 智能模糊决策树算法在英语机器翻译中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 177-180.
- [11] MARCELLO D, VALENTINO D. What's so special about Euclidean distance [J]. Social Choice and Welfare, 2009, 33 (2): 211-233.
- [12] MUHAMMAD A M, MOONSOO K. Euclidean distance based label noise cleaning [C] // 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2017: 237-239.
- [13] 李秀庆, 谢占川, 侯恩卿, 等. 加权欧氏距离法对湟水河监测断面的水质综合评价 [J]. 三峡环境与生态, 2012, 34 (4): 33-35.
- [14] XIAO M W, DETLEF D N, MARTIN S, et al. Intelligent data analysis with fuzzy decision trees [J]. Soft Computing, 2007, 11 (5): 439-457.
- [15] PAUL M, DAVID W, ROHIT R. Model selection for medical diagnosis decision support systems [J]. Decision Support Systems, 2004, 36 (3): 247-259.
- [16] QIANG L, XUN C, NABIL G. Fuzzy pattern recognition of AE signals for grinding burn [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45 (7): 811-818.
- [17] ADELEH A, ALI A. Evaluation of B2B IIM critical success factors using a fuzzy decision analysis method [C] // Isfahan: International Conference on E-Commerce with focus on e-Business, 2015: 1-9.
- [18] CHUNG T S, LI K K, CHEN G J, et al. Multi-objective transmission network planning by a hybrid GA approach with fuzzy decision analysis [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2003, 25 (3): 187-192.
- [19] MICHAEL J G, PATRICK J F G. Weighted Euclidean Biplots [J]. Journal of Classification, 2016, 33 (3): 442-459.
- [20] ANNA L B, ROBERT E U. Decision fusion by fuzzy set operations [C] // IEL Citation, 1994: 1412-1417.
- [21] LIBELLI S M. Fuzzy pattern recognition of circadian cycles in ecosystems [J]. Ecological Modelling, 2004, 174 (1): 67-84.