

基于 AHP、灰色关联法和 TOPSIS 的 航天测控装备评估模型研究

朱东济¹, 蔡红维¹, 欧阳霄¹, 全非¹, 杨辉²

(1. 西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000;

2. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094)

摘要: 测控装备是对航天器发射及运行过程进行跟踪、测量与控制的专用系统, 具有设备种类多、地域分布广、状态参数多等特点, 其性能往往难以得到快速、全面、客观的评估; 针对此问题, 提出了一种基于 AHP 层次分析法、灰色关联分析法和 TOPSIS 的组合模型, 用于航天测控装备性能综合评估, 并以某型雷达为例进行了指标量化与评估验证; 研究表明, 多种方法的综合运用, 既能避免各自的局限性, 又能充分发挥其优点, 其评估过程科学、结果合理, 可以有效解决测控装备难以量化、分析、评估的问题, 具有较强的实用性。

关键词: 测控系统; AHP; 灰色关联; TOPSIS; 量化评估

Research on Evaluation Model of Aerospace TT&C Equipment Based on AHP and Grey Relational Analysis and TOPSIS

ZHU Dongji¹, CAI Hongwei¹, OUYANHG Xiao¹, TONG Fei¹, YANG Hui²

(1. Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, China;

2. China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China)

Abstract: TT&C is a special system for tracking, telemetrying and controlling the launch and operation process of spacecraft, which has many kinds of equipment, wide geographical distribution and many state parameters. So it is difficult to evaluate the performance of its equipment objectively, comprehensively, quickly and accurately. In order to solve this problem, a combined model based on AHP, grey relation and TOPSIS is proposed to evaluate the performance of aerospace TT&C equipment, and a certain radar is taken as an example to quantify and evaluate and verify. The research shows that the comprehensive application of various methods which its process scientific and results reasonable, can not only avoid their own limitations, but also give full play to their own advantages, and can be used to solve the difficult quantitative evaluation problem of TT&C's performance and has strong practicability.

Keywords: TT&C system; AHP; grey relation; TOPSIS; quantitative evaluation

0 引言

随着北斗二代导航卫星、嫦娥探测器、空间实验室等建设需求的增多, 发射场的火箭发射也急剧增多, 我国 2020 年全年 39 次航天发射任务^[1]。测控系统承担着运载火箭发射弹道测量、遥测、遥控等任务, 长期处于工作状态, 测试维护的时间和周期越来越少^[2-3], 这就要求在平时和工作中及时掌握装备的性能状态。由于测控系统有着设备种类多、复杂度高、参数指标杂、地域分布广等特点^[4-5], 评估难度较大。而且, 当前评估方法追求超前的理念和复杂的算法, 评估方法种类繁多、评估理念层出不穷^[6]。所以,

目前发射场测控系统性能评估主要靠岗位人员主观进行分析和评判, 受人员知识能力、技术水平和经验等因素制约, 还没有成熟、客观、全面的性能量化评估系统。

本文结合发射场测控系统的上述特性, 以符合具体的应用环境、以实用为导向, 提出了一种采用传统 AHP 层次分析法、灰色关联分析法和 TOPSIS 法的组合模型, 从指标体系建立到量化分析、再到评估结果输出, 构建了一套完整的数学处理方法用来评估测控系统的装备性能, 并选取具有代表性的某型单脉冲雷达发射机分系统为例, 验证了该方法的可用性、合理性、有效性, 在实际中取得了较好的效果。

收稿日期: 2021-06-18; 修回日期: 2021-09-07。

基金项目: 2015 年军内科研支持项目(2015102706JY004)。

作者简介: 朱东济(1978-), 男, 陕西临潼人, 硕士, 工程师, 主要从事航天测控、航天装备试验鉴定方向的研究。

通讯作者: 蔡红维(1979-), 男, 江苏盐城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天发射测控、发射场总体论证规划方向的研究。

引用格式: 朱东济, 蔡红维, 欧阳霄, 等. 基于 AHP、灰色关联法和 TOPSIS 的航天测控装备评估模型研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 240-244, 255.

1 评估思路与流程

AHP 层次分析法是一种对系统进行层次建模的方法, 该方法由于契合了事物的层次特点, 目前已经应用于很多领域很多方面。每个系统都有各自的指标参数, 这些指标从不同方面表征了系统性能, 而这些指标可能各不相属又紧密关联, 彼此之间即有区别由有联系, 这契合了层次分析法的根本思想。采用层次分析法不仅便于梳理系统存在的指标, 还可以对指标进行分析比较, 最终能够获取各个指标在系统中的权重^[7]。测控系统尽管由各种不同种类的不同功能的装备组成, 但都具有典型的层次结构^[8]。在建立问题的评价指标体系时, 采用 AHP 层次分析原则, 契合了测控系统的层次结构, 更有助于评估指标体系的梳理确定; 对于测定指标数据, 指标的维数和样本量往往没有严格的要求, 不知道具体的分布特性, 很难判定系统是“好”是“坏”, 界限的确定不易分辨, 而这正是灰色分析要解决的问题。1982 年我国学者邓聚龙教授提出了灰色系统理论, 其主要思想就是利用掌握的系统信息对系统进行“非此即彼、非好即坏、非黑即白”的情形评价; 对系统的样本数据也没有严格的要求, 拓宽了其应用范围, 目前已经形成了比较完备的理论体系^[9]。灰色关联度分析作为其中一种多因素统计分析方法, 用灰色关联度来表征因素间关系的大小顺序或强弱关系, 综合灰色关联度, 形成灰色关联系数, 以反应各评价对象对基准或参考对象的接近次序^[10-11]; 对于所有的关联系数求和平均即绝对关联度, 显然不是一个理想的方法。采用 Yoon 和 Hwang 开发的接近理想方案的相对接近程度的序数偏好方法 TOPSIS, 具有方案信息使用较充分, 丢失较少的优点^[12]。所以, 为了更好地体现方案数据曲线位置上的关系, 从而能够集中反映方案决策信息的总体情况, 对灰色关联系数进行数值比较, 可以对整体的偏好程度进行清晰明了的排序^[13-14]。采用 AHP、灰色关联法与 TOPSIS 综合评估的流程包括从指标体系构建→权重量化→指标量化→分析评估→结果确认的全过程, 如图 1 所示。

2 评估过程

2.1 AHP 模型的构建

每一个要评价的对象都应该有反应自身特性的一系列、甚至一大堆指标, 这些指标即区别又联系, 应具有反应评价对象的充分性, 能够从不同的方面反应评价对象的某种性能, 体现出评价对象的优劣程度, 进而所有这些指标的集合形成综合评价系统的指标体系^[15]。指标体系的构建需要一套全面严格的评估规范、评估程序、评估标准^[16-17]。雷达是担负导弹航天发射测控的重要设备, 选取某型单脉冲雷达作为代表, 梳理发射机系统指标层次关系^[18]: 目标层为根目录, 即发射机分系统; 准则层为波形参数、频

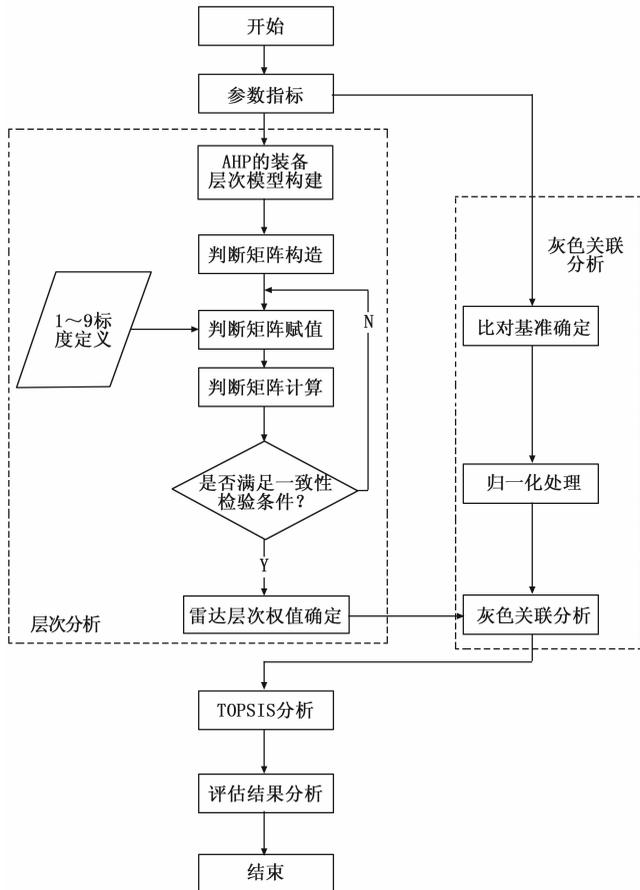


图 1 综合评估流程

谱特性、输出功率、钛泵电源、水冷状态、高压电源、充气组合和调制器等 8 个并列单元; 方案层以脉冲前沿、脉冲后沿、顶降, 杂散分量、谐波分量, 峰值功率、功率稳定度, 收集极电流、管体流量、输出窗流量、温度, 高压电源输出电压、电流, 高压脉冲电压、电流等 15 个子科目作为最低层。钛泵电源和充气组合准则层由于不能再分下级科目, 可直接引申至三级, 这样便于底层指标数据的统一处理。整体层次关系如图 2 所示。

2.2 判断矩阵的构造与赋值

利用图 2 构造的 AHP 模型形成判断矩阵即利用层次关

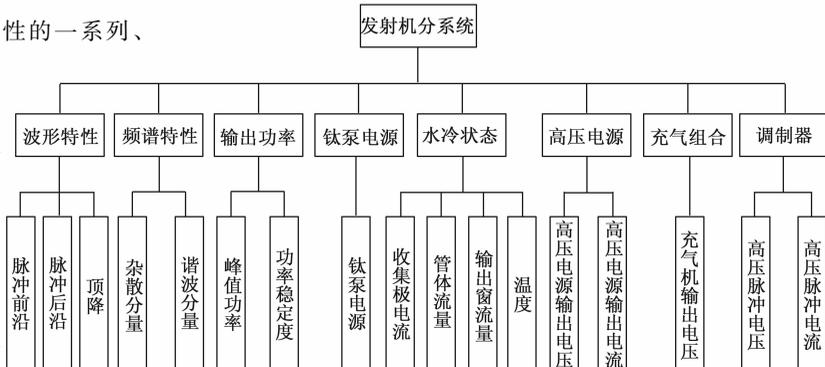


图 2 某型雷达发射机分系统层次关系模型

系构造判断矩阵，同一层次的参数按相应的行和列进行排列，如第二层 8 个参数，可构造 8×8 矩阵，第三层水冷状态参数可构造 4×4 矩阵。矩阵数值引用数字 1~9 及其倒数作为标度^[19]，表 1 列出了 1~9 标度的含义。

表 1 1~9 标度的含义

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性;
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要;
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要;
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要;
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要;
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值;
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 b_{ij} ,那么因素 j 与因素 i 重要性之比为 $b_{ji} = \frac{1}{b_{ij}}$

表中只给出了奇数的含义，但它们之间的数 2、4、6、8 及各数的倒数具有相应的类似意思。

2.3 层次模型权重的确定

利用上文构造的赋值型矩阵计算模型的权重，即从数值矩阵出发，计算矩阵的最大特征根 λ_{\max} ，进而求取对应的特征向量 \mathbf{W} ， \mathbf{W} 即为层次模型的权重。计算矩阵最大特征根 λ_{\max} 及特征向量 \mathbf{W} 方法不一，但都大同小异，区别只是在计算精度上不同而已。由于和积法计算采用近似方法计算比较简化，又能保证足够精确度，这里采用了和积法的计算步骤，详细演示了计算 AHP 权重的过程，具体如下。

1) 将判断矩阵每一列正规化:

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{kj}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

2) 将每一列正规化后的判断矩阵按行相加:

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

3) 对向量 $\bar{\mathbf{W}} = [\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3]^T$ 正规化:

$$\mathbf{W} = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

所得到的 $\mathbf{W} = [W_1, W_2, W_3]^T$ 即为所求特征向量。

4) 计算判断矩阵最大特征根 λ_{\max} :

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(\mathbf{A}\mathbf{W})_i}{n\mathbf{W}_i} \quad (4)$$

式中， $\mathbf{A}\mathbf{W}_i$ 表示向量 $\mathbf{A}\mathbf{W}$ 的第 i 个分量。

5) 判断矩阵的一致性检验:

由于判断矩阵是以人的主观认识构造的，为了防止矩阵的不合理性，需要对矩阵进行一致性检验，计算它的一致性指标 CI ，定义:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

若 $CI=0$ ，则判断矩阵完全一致。 $\lambda_{\max} - n$ 越大，一致性

越差。进一步将 CI 与平均随机一致性指标 RI 进行比较， RI 分别如表 2 所示，则可获得满意的一致性。

表 2 RI 平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.40

对于 1 阶、2 阶判断矩阵，矩阵关系明确，一致性检验意义不大，所以总是完全一致的；当阶数大于 2 时，如果判断矩阵的 $CR = CI/RI < 0.10$ 时，则其具有满意的一致性，否则就需要重新对判断矩阵赋值。通过一致性检验的向量特征向量 \mathbf{W} 才能确定为层次权重。

2.4 TOPSIS 分析

1) 分析指标数据，建立决策矩阵。TOPSIS 法从 n 个属性和方案两个维度形成评价的决策矩阵，属性可视为对象即雷达的层次关系、方案视为一组指标的具体数据。

$$\mathbf{D} = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \cdots & X_j & \cdots & X_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

其中以矩阵的行视为考虑的方案，如 A_i 是第 i 个方案， x_{ij} 是第 i 方案第 j 个属性的具体数值。矩阵确定后还需要进行归一化处理，应根据指标属性区分是效益型属性集合还是成本型属性集合。

2) 确定矩阵的正基准、负基准、参考基准。令两个假设的方案 A^+ 和 A^- 定义为:

$$\begin{aligned} A^+ &= \{ (\max_i v_{ij} \mid j \in J), (\min_i v_{ij} \mid j \in J') \mid i \in M \} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+\} \\ A^- &= \{ (\min_i v_{ij} \mid j \in J), (\max_i v_{ij} \mid j \in J') \mid i \in M \} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中， J 为效益型属性集合， J' 为成本型属性集合。方案 A^+ 和 A^- 分别表示正基准和负基准的方案。

进行关联度分析，首先确定用以反应系统特征的数据序列，用这些数据序列作为参考，再计算关联度。关联度反应各评价对象对正基准或负基准的接近程度，即评价对象的优劣次序，灰色关联度最大的评价对象视为最佳。设置灰色参考数列，将 $\{C^*\} = [C_1^*, C_2^*, \dots, C_n^*]$ 作为参考数列，将 $\{C\} = [C_1^c, C_2^c, \dots, C_n^c]$ 作为被比较数列。

3) 计算灰色关联系数:

用关联分析法计算矩阵灰色关联系数，第 i 个方案第 k 个指标与第 k 个最优指标的关联系数 $\xi_i(k)$ 为:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|}{|C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|} \quad (8)$$

式中, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

由式 (3) 得到权重 W , 由式 (8) 计算关联系数 $\xi_i(k)$ 矩阵:

$$v_i = W(k) \times \xi_i(k) \quad (9)$$

4) 计算距离:

计算每个方案的距离, 通过多维 Euclid 距离来测量。每个方案与正基准方案的距离为:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i \in M \quad (10)$$

同理, 与负基准方案的距离为:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i \in M \quad (11)$$

5) 计算相对基准解的接近度。 A_i 与 A^+ 的相对接近度定义如下:

$$C_i^- = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)}, 0 < C_i^- < 1, i \in M \quad (12)$$

依据 C_i^- 的降序, 排列偏好顺序。

3 评估实例与分析

3.1 雷达 AHP 模型分析

由图 1 可知, 以发射机分系统为根目录, 其下的层次有 8 个并列单元, 对这 8 个单元按行和列排列, 由式 (1) 形成 8×8 矩阵, 如表 3 所示; 同理, 以水冷状态参数这一层为目录, 其下有 4 个并列单元, 对这 4 个单元也按行和列排列, 形成 4×4 矩阵, 如表 4 所示。对于 4 阶以下的矩阵, 由于单元关系简单明了, 直接采用专家赋权法。

表 3 发射机准则层判断矩阵

发射机系统	波形特性	频谱特性	输出功率	钛泵电源	水冷状态	高压电源	充气组合	调制器
波形特性	1	1	7	5	8	2	7	2
频谱特性	1	1	7	5	8	2	7	2
输出功率	1/7	1/7	1	1/3	2	1/3	1	1/4
钛泵电源	1/5	1/5	3	1	3	1/2	1/2	1/3
水冷状态	1/8	1/8	1/2	1/3	1	1/4	1/2	1/5
高压电源	1/2	1/2	3	2	4	1	5	1
充气组合	1/7	1/7	1	2	2	1/5	1	1/5
调制器	1/2	1/2	4	3	5	1	5	1

表 4 水冷状态判断矩阵

水冷状态	收集极流量	管体流量	线包流量	温度
收集极流量	1	1/5	1/5	1/7
管体流量	5	1	1	1/3
线包流量	5	1	1	1/3
温度	7	3	3	1

3.2 雷达 AHP 权值计算

式 (1) ~ (5) 的计算有特征根法、方根法、和积法、行和归一化法, 仅有计算速度的区别, 计算结果差异不大。本文采用和积法, 计算结果如下:

4×4 矩阵: 特征向量 = $[0.052\ 86\ 0.211\ 65\ 0.211\ 65\ 0.523\ 84]^T$

$$\lambda_{\max} = 4.073\ 849$$

$$CI = 0.024\ 616$$

$$CR = 0.027\ 352 < 0.10$$

8×8 矩阵:

特征向量 = $[0.268\ 574\ 0.268\ 574\ 0.039\ 241\ 0.062\ 921\ 0.027\ 219\ 0.135\ 525\ 0.047\ 219\ 0.150\ 726]^T$

$$\lambda_{\max} = 8.324\ 788$$

$$CI = 0.046\ 398$$

$$CR = 0.032\ 907 < 0.10$$

从权重 (特征向量)、最大特征根、一致性指标等参数看, 判断矩阵设置合理, 权重计算结果一致性良好。用和积法计算发射机分系统得到的权重为第一层权重, 水冷状态权重为第二层权重, 第二层其它权重采用专家赋权法^[20]。对应的的二层权重和相应的第一层权重对应相乘, 得到最底层的权重 W 。

$W = [0.268\ 574 * 0.5\ 0.268\ 574 * 0.3\ 0.268\ 574 * 0.2\ 0.268\ 574 * 0.5\ 0.268\ 574 * 0.5\ 0.039\ 241 * 0.5\ 0.039\ 241 * 0.5\ 0.062\ 921\ 0.027\ 219 * 0.052\ 86\ 0.027\ 219 * 0.211\ 65\ 0.027\ 219 * 0.211\ 65\ 0.027\ 219 * 0.523\ 84\ 0.135\ 525 * 0.5\ 0.135\ 525 * 0.5\ 0.047\ 219\ 0.150\ 726 * 0.5\ 0.150\ 726 * 0.5]$, AHP 模型的权重量化如图 3 所示。

3.3 雷达指标参数归一化、灰色关联度

本文将正理想归一化为 1、负理想归一化为 0, 并以正理想为参数数列。指标参数归一化、灰色关联系数, 结果如表 5 所示。

3.4 综合评估结果

由式 (10) ~ (12) 可知, 如果 $A_i = A^+$, 那么 $C_i^- = 1$; 如果 $A_i = A^-$, 那么 $C_i^- = 0$ 。当 C_i^- 趋近 1 时, 方案 A_i 接近 A^+ , 据此计算表 5 中的序列综合结果, 计算结果如下。

序列 1: $S_i^+ = 0.08; S_i^- = 0.053; C_i^- = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} = 0.602;$

序列 2: $S_i^+ = 0.066; S_i^- = 0.101; C_i^- = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} = 0.395;$

序列 3: $S_i^+ = 0.113; S_i^- = 0.067; C_i^- = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} = 0.628。$

根据综合评判结果排序, 序列 3 > 序列 1 > 序列 2, 所以序列 3 的量化评估效果比序列 1 的效果好, 序列 1 的效果比序列 2 好。数值大小直观的互相对比, 非常便于测试、联

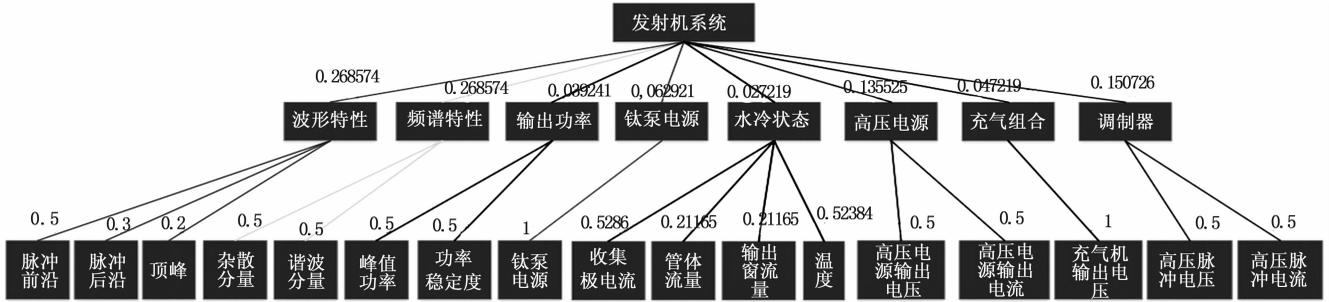


图 3 发射机权重量化 AHP 模型

表 5 发射机系统评价指标、归一化及关联系数 $\xi_i(k)$

序列	指标 关联度	脉冲 前沿	脉冲 后沿	顶降	杂散 分量	谐波 分量	峰值 功率	功率 稳定度	钛泵 电流	收集 极电 流	管体 流量	线包 流量	温度	高压电 源输出 电压	高压电 源输出 电流	充气机 输出压 力	高压 脉冲电 压	高压 脉冲电 流	
		A^+	归一化	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	关联度	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	归一化	0.40	0.50	0.50	0.67	0.50	0.40	0.50	0.40	0.40	0.40	0.67	0.60	0.60	0.50	0.60	0.60	0.50	
	关联度	0.69	0.73	0.73	0.80	0.73	0.69	0.73	0.69	0.69	0.69	0.80	0.77	0.77	0.73	0.77	0.77	0.73	
A^+	归一化	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	关联度	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	
2	归一化	1.90	1.49	1.20	1.07	1.00	2.00	2.00	1.98	1.20	1.02	1.17	2.00	1.00	1.05	1.20	1.00	1.00	
	关联度	0.60	0.73	0.87	0.95	1.00	0.57	0.57	0.58	0.87	0.99	0.89	0.57	1.00	0.96	0.87	1.00	1.00	
3	归一化	0.00	1.30	0.50	-0.33	0.00	0.60	0.00	-0.40	0.00	0.20	-1.67	-1.00	1.00	1.05	1.20	1.00	1.00	
	关联度	0.57	0.82	0.73	0.50	0.57	0.77	0.57	0.49	0.57	0.63	0.33	0.40	1.00	0.96	0.87	1.00	1.00	

调、合练等过程效果的评估。例如，在测控系统联调中，当积累足够多的数据后还可以对联调等级进行更仔细的划分，从而对联调效果进行更精确的评估。综合评估方法，用 AHP 确定指标权重、将指标优劣中间的灰色地带转换成定量指标，用 TOPSIS 法进行最后的选择，避免了评估过程每个环节依靠岗位人员评估的主观性。

4 结束语

针对测控装备评估难的问题，采用 AHP 层次分析法进行指标体系的权重量化、灰色关联分析对多维指标参数进行分析处理、TOPSIS 法进行灰色比较选择，从而建立起测控装备量化评估的综合模型；并以航天发射场具有代表性的某型雷达发射机分系统为例，验证了该模型的合理性、可靠性、有效性。采用 AHP 基于测控系统本身的层次结构，有利于指标体系的梳理和建立；采用灰色关联法针对测控系统装备参数多、指标差异大的特点，避免了岗位人员评估的主观性，能够比较客观、全面的评估系统性能；应用 TOPSIS 则能够对 AHP 和灰色关联结果产生清楚的偏好顺序。

采用该综合评估方法，可以解决航天测控装备性能量化分析难以及时、客观、全面评估的问题，但由于测控装备种类多、系统复杂度高，在将本文对单脉冲雷达的处理方法应用在其他设备时，还需要根据具体实际情况进行针

对性的层次关系梳理、灰色关联和 TOPSIS 计算。另外，评估方法给出的结果可能和人为判断存在不一致的地方，这还需要根据相关人员的技术经验、知识水平等方法不断完善和改进，才能更贴合于实际。

参考文献:

- [1] 张鑫伟, 付郁. 2020 年全球航天发射统计分析 [J]. 国际太空, 2021 (2): 8-24.
- [2] 路建功, 吕久明, 李建华. 航天发射测控力量体系化建设 [J]. 国防科技, 2019 (1): 68-71.
- [3] 张维义. 航天测控系统测试资源优化配置策略 [J]. 信息技术与信息化, 2019 (8): 240-242.
- [4] 成求青, 李波, 余浩章, 等. 导弹测控系统系统总体设计原理与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 2-16.
- [5] 马志强. 新形势下航天测控系统建设转型思考 [J]. 飞行器测控学报, 2016, 35 (5): 329-335.
- [6] Daniel L. Stufflebeam, George F. Madaus, Thomas Kellaghan, 等. 评估模型 [M]. 苏锦丽, 等译. 北京: 北京大学出版社, 2007: 499-513.
- [7] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 (第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 11-33.
- [8] 任猛, 周伟静, 郭建华. 基于 AHP 的靶场测控系统综合性评估 [J]. 电讯技术, 2012, 56 (12): 1876-1880.

(下转第 255 页)