

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.03.019

基于区间灰色不确定语言的工作类型优化方法

张节, 孙勇, 万宇, 廖家锋

(中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所, 成都 610031)

摘要: 针对飞机维修任务工作类型优化过程中的模糊与灰色问题, 采用区间灰色不确定语言变量建立工作类型的评价指标和决策模型, 提出了军机维修任务工作类型优化方法。对优化方法进行了实例分析, 工作类型排序结果和数据对比结果验证了优化方法的可行性与有效性。在某军机上对优化方法进行了工程应用, 完成 192 项初始维修任务工作类型优化, 应用结果表明了该优化方法具备良好的工程应用价值, 可有效提升工作类型合理性。

关键词: 航空维修; 维修任务; 工作类型优化; 区间灰色不确定语言; 维修决策

中图分类号: V267 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)03-0463-07

Optimization for Maintenance Task Type Based on Interval Grey Uncertain Linguistic Information

ZHANG Jie, SUN Yong, WAN Yu, LIAO Jiafeng

(AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: Taking into account fuzzy and grey problems of aircraft maintenance task type optimization, the evaluation index system and the decision model of maintenance task type were built by using interval grey uncertain linguistic variables. Then the optimization method for maintenance task type of military aircraft was proposed. An optimization example was demonstrated. As a result, the rank of task type alternatives and the comparisons of data indicate that the proposed optimization method is feasible and effective. Having used the proposed optimization method in an actual project of initial maintenance task type optimizations of a military aircraft, task types of 192 initial maintenance tasks were optimized successfully. According to the application result, the proposed optimization method promotes the reasonability of maintenance task types, thus possessing a favorable prospect in engineering applications.

Key words: aviation maintenance; maintenance task; task type optimization; interval grey uncertain linguistic information; maintenance decision

为保证飞机适航, 需持续优化飞机维修大纲中的维修任务。维修任务优化技术是当前国内外的研究热点, 国外发布了 IP44、S4000P 等优化程序标准, 并深入研究了程序各环节涉及的优化方法, 相关成果已应用于 F-35、B737NG 等军、民用飞机^[1-2]。国内民航采用国外标准的程序、军机采用

GJB1378A 标准的程序, 但仅研究了维修间隔和任务打包的优化方法, 缺少工作类型的优化方法^[3-4]。这导致当前优化军机初始维修任务的工作类型时, 只能凭经验判断, 难以解决过度维修或维修不足的问题, 影响维修质量、周期、成本。

维修任务工作类型包括使用检查、功能检测、

基金项目: 国防科工局军贸科研资助项目。

收稿日期: 2020-06-22; **修订日期:** 2021-03-28

通信作者: 张节, 男, 工程师, E-mail: nathanzhang@nuaa.edu.cn。

引用格式: 张节, 孙勇, 万宇, 等. 基于区间灰色不确定语言的工作类型优化方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 463-469. ZHANG Jie, SUN Yong, WAN Yu, et al. Optimization for maintenance task type based on interval grey uncertain linguistic information[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 463-469.

定时拆修等,优化时需由多位设计员考虑多方面因素决策最适用的类型。该过程实质为多指标群决策过程,可建立评价指标和决策模型有效处理,类似工程案例如飞机选材设计^[5]、飞机概念设计^[6]、设备布局方案优选^[7]、水轮机设计方案优选^[8]等。但是,由于维修对象种类多,无法统一参数定量评价,设计员只能用不确定的自然语言定性评价,优化过程具有模糊性;同时,由于设计员仅精通部分领域,且能力参差不齐,无法避免不充分的主观认知影响,优化过程还具有灰色性。模糊、灰色问题直接影响工作类型的优化结果,为此引入区间灰色不确定语言(Interval grey uncertain linguistic information, IGUL)解决^[9-11]。

本文从工程实际问题出发,基于区间灰色不确定语言,开展工作类型优化方法及其应用研究。具体包括:采用IGUL变量表达评价信息,给出变量的相关定义和集结算子;基于IGUL变量,建立军机维修任务工作类型的评价指标和决策模型,形成工作类型优化方法;分析验证方法的可行性与有效性,并应用优化方法优化某军机初始维修任务的工作类型。

1 区间灰色不确定语言

1.1 语言评价集

$H = \{H_i | i = 0, 1, \dots, l\}$ 是 $l+1$ 粒度的语言评价集。其中, l 为偶数, H_i 为自然语言, H_i 与下标 i 属严格单调递增关系^[12-13]。例如, {差, 较差, 一般, 较好, 好} 为 5 粒度语言评价集。

为减少评价信息丢失, 定义函数 $f: H_i = f(i)$, 将离散型评价集拓展为连续型评价集 $H = \{H_\alpha | \alpha \in [0, l]\}$ ^[10]。

1.2 语言变量

根据文献[14]定义, 空间 $X = \{x\}$ 上点 x 的灰色模糊变量为 $\tilde{A} = (\tilde{A}, A)$ 。其中, 模部 $\tilde{A} = \mu_A(x)$ 表达变量的模糊性, 灰部 $A = \nu_A(x)$ 表达变量的灰色性, 灰度越大表示可信度越低。

定义 1^[9] 取空间上点 x 的灰色模糊变量 $\tilde{A} = (\tilde{A}, A)$, 若模部用闭区间不确定语言项 $[H_{\alpha_A}, H_{\beta_A}]$ 表示, 灰部用闭区间实数 $[g_{L_A}, g_{U_A}]$ 表示, 则称 \tilde{A} 为 IGUL 变量, 记为

$$\tilde{A} = ([H_{\alpha_A}, H_{\beta_A}], [g_{L_A}, g_{U_A}])$$

式中: $[\alpha_A, \beta_A] \subseteq [0, l]$, $[g_{L_A}, g_{U_A}] \subseteq [0, 1]$ 。

定义 2 设 IGUL 变量 \tilde{A}, \tilde{B} , 变量运算法则为

(1)

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = ([H_{\alpha_A + \alpha_B}, H_{\beta_A + \beta_B}], [\max(g_{L_A}, g_{L_B}), \max(g_{U_A}, g_{U_B})]);$$

(2) $\tilde{A} \otimes \tilde{B} = ([H_{\alpha_A \times \alpha_B}, H_{\beta_A \times \beta_B}], [g_{L_A} + g_{L_B} -$

$$g_{L_A} \cdot g_{L_B}, g_{U_A} + g_{U_B} - g_{U_A} \cdot g_{U_B}]);$$

(3) $\lambda \tilde{A} = ([H_{\lambda \alpha_A}, H_{\lambda \beta_A}], [g_{L_A}, g_{U_A}]);$

(4) $\tilde{A}^\lambda = ([H_{\alpha_A^\lambda}, H_{\beta_A^\lambda}], [1 - (1 - g_{L_A})^\lambda, 1 - (1 - g_{U_A})^\lambda])$ 。

定义 3^[9] 设 IGUL 变量 \tilde{A}, \tilde{B} , 变量距离为

$$d(\tilde{A}, \tilde{B}) = \frac{1}{4l} (|(1 - g_{L_A})\alpha_A - (1 - g_{L_B})\alpha_B| + |(1 - g_{U_A})\alpha_A - (1 - g_{U_B})\alpha_B| + |(1 - g_{L_A})\beta_A - (1 - g_{L_B})\beta_B| + |(1 - g_{U_A})\beta_A - (1 - g_{U_B})\beta_B|) \quad (1)$$

根据文献[15]定义, 在 H 上的函数 I 形式如下, 则称 I 为取下标算子

$$I: H \rightarrow R$$

$$I(H_\alpha) = \alpha, H_\alpha \in H$$

式中: R 为实数, $H = \{H_\alpha | \alpha \in [0, l]\}$ 为语言评价集。

定义 4^[16-17] 设 $[a, b]$ 为区间数, 则连续区间有序加权平均(Continuous interval ordered weighted averaging, C-OWA)算子为

$$f_\rho([a, b]) = \int_0^1 \frac{d\rho(x)}{dx} [b - x(b - a)] dx \quad (2)$$

式中: $\rho(x): [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ 为基本单位区间单调函数, 通常选用幂函数 $\rho(x) = x^2$ 。

根据定义可知, C-OWA 算子为区间数的评价提供了量化方法, 以此可进一步定义评价不确定语言区间数的量化方法。

定义 5 设 $[H_\alpha, H_\beta]$ 为不确定语言区间数, 则不确定语言连续区间有序加权平均(Uncertain linguistic continuous interval ordered weighted averaging, ULC-OWA)算子为

$$f_\rho([H_\alpha, H_\beta]) = \int_0^1 \frac{d\rho(x)}{dx} [I(H_\beta) - x(I(H_\beta) - I(H_\alpha))] dx \quad (3)$$

因此, 对于 IGUL 变量 \tilde{A} , 可使用 C-OWA 算子和 ULC-OWA 算子分别对灰部和模部量化, 求得综合评价值 G_A , 如式(4)。通过综合评价值可比较变量大小, 若 $G_A \leq G_B$, 则 $\tilde{A} \leq \tilde{B}$, 反之亦然。

$$\begin{cases} G_A = f_\rho([\ (1 - G'_A)H_{\alpha_A}, (1 + G'_A)H_{\beta_A} \]) \\ G'_A = f_\rho([\ g_{L_A}, g_{U_A} \]) \end{cases} \quad (4)$$

1.3 集结算子

定义 6 设 $\tilde{A} = \{ \tilde{A}_i | i = 1, 2, \dots, n \}$ 为一组 IGUL 变量, $\tilde{A}_i = ([H_{\alpha_i}, H_{\beta_i}], [g_{L_i}, g_{U_i}])$, 且

$$g_\omega(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n) = \sum_{i=1}^n \varepsilon \tilde{\omega}_i \tilde{A}_i \quad (5)$$

式中: $\varepsilon = 1/l$ 为调节系数, $\tilde{\omega}_i$ 是 \tilde{A}_i 对应的权重, $\tilde{\omega}_i = ([H_{\alpha_{\omega_i}}, H_{\beta_{\omega_i}}], [g_{L_{\omega_i}}, g_{U_{\omega_i}}])$, 则称 g_ω 为区间灰色不确定语言加权集结 (Interval grey uncertain linguistic weighted aggregation, IGUL-WA) 算子。

定义 7 设 $\tilde{A} = \{ \tilde{A}_i | i = 1, 2, \dots, n \}$ 为一组 IGUL 变量, $\tilde{A}_i = ([H_{\alpha_i}, H_{\beta_i}], [g_{L_i}, g_{U_i}])$, 且

$$g_w(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n) = \sum_{i=1}^n \varepsilon \tilde{W}_i \tilde{A}_i' \quad (6)$$

式中: $\varepsilon = 1/l$ 为调节系数, \tilde{A}' 是 \tilde{A} 由大到小排序后的变量, \tilde{W}_i 是 \tilde{A}_i' 对应的权重, $\tilde{W}_i = ([H_{\alpha_{w_i}}, H_{\beta_{w_i}}], [g_{L_{w_i}}, g_{U_{w_i}}])$, 则称 g_w 为区间灰色不确定语言有序加权集结 (Interval grey uncertain linguistic ordered weighted aggregation, IGUL-OWA) 算子。

定义 8 设 $\tilde{A} = \{ \tilde{A}_i | i = 1, 2, \dots, n \}$ 为一组 IGUL 变量, $\tilde{A}_i = ([H_{\alpha_i}, H_{\beta_i}], [g_{L_i}, g_{U_i}])$, 且

$$\begin{cases} g_{\omega, w}(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n) = \sum_{i=1}^n \varepsilon \tilde{W}_i \tilde{B}_i' \\ \tilde{B}_i = \varepsilon \tilde{\omega}_i \tilde{A}_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\varepsilon = 1/l$ 为调节系数, $\tilde{\omega}_i$ 是 \tilde{A}_i 对应的权重, $\tilde{\omega}_i = ([H_{\alpha_{\omega_i}}, H_{\beta_{\omega_i}}], [g_{L_{\omega_i}}, g_{U_{\omega_i}}])$, \tilde{B} 是 \tilde{A} 加权后的变量, $\tilde{B}_i = ([H_{\alpha_i}, H_{\beta_i}], [g_{L_i}, g_{U_i}])$, \tilde{B}' 是 \tilde{B} 由大到小排序后的变量, \tilde{W}_i 是 \tilde{B}_i' 对应的权重, $\tilde{W}_i = ([H_{\alpha_{w_i}}, H_{\beta_{w_i}}], [g_{L_{w_i}}, g_{U_{w_i}}])$, 则称 $g_{\omega, w}$ 为区间灰色不确定语言混合加权集结 (Interval grey uncertain linguistic hybrid weighted aggregation, IGUL-HWA) 算子。

实际中通常将权重 $\tilde{\omega}_i$ 转化为实数 ω_i , 且需满足 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$, 通常将权重 \tilde{W}_i 转化为实数 W_i , 并选

用组合数 $W_i = C_{n-1}^{i-1} / 2^{n-1}$ 。IGUL-HWA 算子转化为

$$\begin{cases} g_{\omega, w}(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_n) = \sum_{i=1}^n W_i \tilde{B}_i' \\ \tilde{B}_i = \omega_i \tilde{A}_i \end{cases} \quad (8)$$

IGUL-WA 算子按变量自身的重要程度进行加权, IGUL-OWA 算子按变量大小的重要程度进行加权; 而 IGUL-HWA 算子在保留变量自身重要程度的基础上, 通过灵活设置不同大小变量的重要程度, 达到减小极端值影响的效果。IGUL-HWA 算子兼具前两种算子的优点, 将其用于后文优化方法。

2 军机维修任务工作类型优化方法

2.1 评价指标

维修任务的工作类型包括保养、操作人员监控、使用检查、功能检测、定时拆修、定时报废, 维修深度依次递增。保养指简单清洁、调整等工作, 操作人员监控指正常使用时观察功能是否异常, 使用检查指按计划定性检查功能是否异常, 功能检测指按计划定量检测性能指标是否在规定范围, 定时拆修指按计划分解更换零件或翻修, 定时报废指按计划整体更换。国军标中定义了各工作类型适用的故障规律, 维修项目实际故障规律与该定义的匹配程度, 即为当前优化工作类型的唯一判断。

将“匹配程度”作为评价工作类型是否满足安全要求的指标。但其只是片面地从理论角度评价, 实际还需根据修后效果验证, 因此增设“维修效果”指标。军机系统复杂、设备多, 但需快速恢复战斗力, 以满足外场高完好率的任务要求, 因此设置“维修难度”“维修工作量”“维修周期”指标。军机机群规模大、保障成本高, 为满足经济要求, 因此设置“维修费用”“配套费用”指标。评价指标及语言评价集 (以 7 粒度为例) 如表 1。

表 1 军机维修任务工作类型评价指标

Table 1 Evaluation index system of military aircraft maintenance task type

序号	指标名称	语言评价集(7 粒度)						
1	匹配程度	很低	低	较低	一般	较高	高	很高
2	维修效果	很差	差	较差	一般	较好	好	很好
3	维修难度	很高	高	较高	一般	较低	低	很低
4	维修工作量	很大	大	较大	一般	较小	小	很小
5	维修周期	很长	长	较长	一般	较短	短	很短
6	维修费用	很高	高	较高	一般	较低	低	很低
7	配套费用	很高	高	较高	一般	较低	低	很低

2.2 决策模型

设由设计员 $P = \{p_k | k = 1, 2, \dots, r\}$ 优化工作类型, 备选工作类型 $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots, m\}$, 评价指标 $C = \{c_j | j = 1, 2, \dots, n\}$, 语言评价集为 $l + 1$ 粒度, 设计员权重 $\omega^p = \{\omega_k^p | k = 1, 2, \dots, r\}$, 且 $\sum_{k=1}^r \omega_k^p = 1$. 设计员 p_k 对工作类型 x_i 关于指标 c_j 的评价用 IGUL 变量表示为

$$\widetilde{A}_{ij}^k = ([H_{\alpha_{ij}}^k, H_{\beta_{ij}}^k], [g_{L_{ij}}^k, g_{U_{ij}}^k])$$

式中: $[H_{\alpha_{ij}}^k, H_{\beta_{ij}}^k] \subseteq [H_0, H_l], [g_{L_{ij}}^k, g_{U_{ij}}^k] \subseteq [0, 1]$.

(1) 集结决策矩阵

各设计员独立评价, 形成个体决策矩阵 $\widetilde{A}^k = (\widetilde{A}_{ij}^k)_{m \times n}$. 根据权重 ω^p , 利用 IGUL-HWA 算子集结得到群体决策矩阵 $\widetilde{A} = (\widetilde{A}_{ij})_{m \times n}$. 其中, 群体对工作类型 x_i 关于指标 c_j 的评价 \widetilde{A}_{ij} 为

$$\widetilde{A}_{ij} = g_{\omega^p, w}(\widetilde{A}_{ij}^1, \widetilde{A}_{ij}^2, \dots, \widetilde{A}_{ij}^r) \tag{9}$$

(2) 确定指标权重

指标权重确定方法包括主观赋权法、客观赋权法、主客观赋权法^[18]. 考虑到现实优化中设计员会表达对评价指标的偏好, 提出带有偏好信息的主客观综合赋权法.

首先求 \widetilde{A}_{ij} 与其他工作类型关于指标 c_j 的评价偏差

$$\delta_{ij} = \sum_{\xi=1}^m d(\widetilde{A}_{ij}, \widetilde{A}_{\xi j}) \tag{10}$$

接着求关于各评价指标的评价偏差和如式(11), 以及评价信息熵如式(12)

$$\delta_j = \sum_{i=1}^m \delta_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{\xi=1}^m d(\widetilde{A}_{ij}, \widetilde{A}_{\xi j}) \tag{11}$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{\delta_{ij}}{\delta_j} \ln \frac{\delta_{ij}}{\delta_j} \tag{12}$$

根据熵求指标 c_j 的客观权重为

$$\widetilde{A}^1 =$$

$$\begin{bmatrix} ([H_4, H_5], [0.3, 0.5]) & ([H_4, H_6], [0.4, 0.6]) & ([H_2, H_3], [0.3, 0.5]) & ([H_2, H_3], [0.4, 0.5]) & ([H_2, H_3], [0.3, 0.4]) & ([H_5, H_6], [0.1, 0.2]) & ([H_2, H_4], [0.2, 0.3]) \\ ([H_5, H_6], [0.3, 0.4]) & ([H_1, H_2], [0.5, 0.8]) & ([H_4, H_5], [0.3, 0.5]) & ([H_2, H_4], [0.5, 0.6]) & ([H_3, H_4], [0.3, 0.5]) & ([H_1, H_2], [0.2, 0.3]) & ([H_2, H_4], [0.3, 0.5]) \\ ([H_3, H_4], [0.5, 0.6]) & ([H_2, H_4], [0.1, 0.3]) & ([H_1, H_2], [0.6, 0.8]) & ([H_1, H_2], [0.2, 0.3]) & ([H_1, H_2], [0.5, 0.7]) & ([H_3, H_4], [0.4, 0.6]) & ([H_2, H_3], [0.6, 0.8]) \end{bmatrix}$$

$$\widetilde{A}^2 =$$

$$\begin{bmatrix} ([H_3, H_5], [0.1, 0.2]) & ([H_5, H_6], [0.4, 0.5]) & ([H_4, H_5], [0.5, 0.7]) & ([H_3, H_5], [0.2, 0.4]) & ([H_3, H_5], [0.2, 0.3]) & ([H_5, H_6], [0.2, 0.3]) & ([H_4, H_5], [0.2, 0.4]) \\ ([H_4, H_6], [0.1, 0.2]) & ([H_3, H_4], [0.6, 0.9]) & ([H_4, H_5], [0.4, 0.5]) & ([H_3, H_6], [0.4, 0.5]) & ([H_3, H_5], [0.2, 0.3]) & ([H_1, H_2], [0.2, 0.3]) & ([H_4, H_6], [0.3, 0.4]) \\ ([H_4, H_6], [0.6, 0.8]) & ([H_4, H_5], [0.6, 0.7]) & ([H_1, H_4], [0.8, 0.9]) & ([H_2, H_3], [0.6, 0.7]) & ([H_4, H_5], [0.4, 0.7]) & ([H_3, H_4], [0.4, 0.7]) & ([H_3, H_4], [0.5, 0.7]) \end{bmatrix}$$

$$\omega_{oj}^l = 1 - E_j \tag{13}$$

归一化可得客观权重 $\omega_o = \{\omega_{oj} | j = 1, 2, \dots, n\}$. 然后收集设计员对指标权重带有偏好的评价, 使用 IGUL-HWA 算子集结并将结果归一化, 得到群体主观权重 $\omega_s = \{\omega_{sj} | j = 1, 2, \dots, n\}$.

使用 ω_o 修正 ω_s 得到综合权重 $\omega = \{\omega_j | j = 1, 2, \dots, n\}$, 其中 ω_j 为

$$\omega_j = \theta \omega_{sj} + (1 - \theta) \omega_{oj} \tag{14}$$

式中: $\theta \in [0, 1]$ 为系数, 其值越大代表主观权重越重要.

(3) 计算综合评价

根据综合权重 ω , 利用 IGUL-HWA 算子集结群体决策矩阵 \widetilde{A} 中工作类型关于各指标的评价值, 得工作类型的 IGUL 变量评价 \widetilde{G}_i 如式(15), 量化得综合评价值 G_i

$$\widetilde{G}_i = g_{\omega, w}(\widetilde{A}_{i1}, \widetilde{A}_{i2}, \dots, \widetilde{A}_{in}) \tag{15}$$

(4) 优选工作类型

通过比较综合评价值优选工作类型. 值越大, 代表工作类型越优.

3 应用研究

某军机初始维修大纲规定某开关产品需执行“定时报废”. 但是该产品报废时故障率低, 部分产品延长试用时性能正常, 且产品状态可检测、故障产品可修复. 因而认为产品报废时仍有使用价值, 可以检查或修理代替报废, 存在过度维修, 工作类型需优化.

对此应用本文方法: 设计员 4 名 $P = \{p_k | k = 1, 2, 3, 4\}$, 权重 $\omega^p = \{0.4, 0.2, 0.3, 0.1\}$; 备选工作类型 3 个 $X = \{x_i | i = 1, 2, 3\}$, 分别为定时拆修、定时报废、功能检测; 评价指标 7 个 $C = \{c_j | j = 1, 2, \dots, 7\}$, 语言评价集为 7 粒度 $H = \{H_0, H_1, \dots, H_6\}$, 如表 1.

各设计员进行评价, 得个人决策矩阵 \widetilde{A}^k 为

$$\widetilde{A}^3 =$$

$$\begin{bmatrix} ([H_5, H_6], [0.3, 0.6]) & ([H_5, H_6], [0.3, 0.4]) & ([H_4, H_5], [0.2, 0.3]) & ([H_3, H_5], [0.1, 0.4]) & ([H_4, H_6], [0.2, 0.3]) & ([H_4, H_5], [0.4, 0.6]) & ([H_4, H_6], [0.2, 0.3]) \\ ([H_5, H_6], [0.4, 0.6]) & ([H_2, H_4], [0.2, 0.3]) & ([H_3, H_3], [0.3, 0.5]) & ([H_3, H_5], [0.3, 0.5]) & ([H_4, H_6], [0.1, 0.3]) & ([H_2, H_3], [0.4, 0.5]) & ([H_5, H_6], [0.2, 0.4]) \\ ([H_2, H_4], [0.3, 0.7]) & ([H_4, H_5], [0.4, 0.6]) & ([H_2, H_3], [0.4, 0.5]) & ([H_2, H_4], [0.2, 0.5]) & ([H_2, H_3], [0.4, 0.5]) & ([H_3, H_5], [0.5, 0.6]) & ([H_5, H_6], [0.2, 0.4]) \end{bmatrix}$$

$$\widetilde{A}^4 =$$

$$\begin{bmatrix} ([H_3, H_5], [0.4, 0.6]) & ([H_5, H_6], [0.3, 0.6]) & ([H_3, H_5], [0.2, 0.4]) & ([H_3, H_4], [0.5, 0.6]) & ([H_4, H_6], [0.4, 0.5]) & ([H_5, H_6], [0.4, 0.5]) & ([H_5, H_6], [0.6, 0.7]) \\ ([H_4, H_5], [0.4, 0.5]) & ([H_4, H_5], [0.2, 0.5]) & ([H_3, H_5], [0.3, 0.4]) & ([H_4, H_5], [0.4, 0.5]) & ([H_2, H_4], [0.1, 0.5]) & ([H_2, H_3], [0.2, 0.4]) & ([H_5, H_6], [0.6, 0.8]) \\ ([H_5, H_6], [0.5, 0.8]) & ([H_4, H_6], [0.4, 0.6]) & ([H_2, H_3], [0.2, 0.4]) & ([H_2, H_4], [0.5, 0.7]) & ([H_1, H_4], [0.3, 0.6]) & ([H_1, H_3], [0.6, 0.8]) & ([H_4, H_5], [0.5, 0.6]) \end{bmatrix}$$

以 $\widetilde{A}_{16}^1 = ([H_5, H_6], [0.1, 0.2])$ 为例,指设计

员 1 对工作类型 1 关于指标 6 的评价为 $H_5 \sim H_6$, 该评价的灰度为 0.1 ~ 0.2; 即, 第 1 名设计员评价“定

$$\widetilde{A} =$$

$$\begin{bmatrix} ([H_{1.03}, H_{1.33}], [0.4, 0.6]) & ([H_{1.20}, H_{1.50}], [0.4, 0.6]) & ([H_{0.79}, H_{1.08}], [0.5, 0.7]) & ([H_{0.68}, H_{1.06}], [0.5, 0.6]) & ([H_{0.73}, H_{1.13}], [0.4, 0.5]) & ([H_{1.14}, H_{1.33}], [0.4, 0.6]) & ([H_{0.81}, H_{1.28}], [0.6, 0.7]) \\ ([H_{1.16}, H_{1.40}], [0.4, 0.6]) & ([H_{0.50}, H_{0.81}], [0.6, 0.9]) & ([H_{0.88}, H_{1.25}], [0.4, 0.5]) & ([H_{0.71}, H_{1.28}], [0.5, 0.6]) & ([H_{0.85}, H_{1.25}], [0.3, 0.5]) & ([H_{0.33}, H_{0.60}], [0.4, 0.5]) & ([H_{0.85}, H_{1.35}], [0.6, 0.8]) \\ ([H_{0.74}, H_{1.13}], [0.6, 0.8]) & ([H_{0.80}, H_{1.24}], [0.6, 0.7]) & ([H_{0.33}, H_{0.75}], [0.8, 0.9]) & ([H_{0.40}, H_{0.73}], [0.6, 0.7]) & ([H_{0.49}, H_{0.81}], [0.5, 0.7]) & ([H_{0.73}, H_{1.10}], [0.6, 0.8]) & ([H_{0.76}, H_{1.04}], [0.6, 0.8]) \end{bmatrix}$$

根据群体决策矩阵,由式(12)可得熵为

$$E = \{0.969, 0.983, 0.984, 0.974, 0.981, 0.970, 0.993\}$$

进而可得客观权重为

$$\widetilde{\omega}_s^1 =$$

$$\{([H_5, H_6], [0.4, 0.6]) & ([H_5, H_6], [0.4, 0.6]) & ([H_2, H_3], [0.2, 0.4]) & ([H_4, H_5], [0.3, 0.5]) & ([H_3, H_5], [0.6, 0.7]) & ([H_5, H_6], [0.3, 0.4]) & ([H_2, H_3], [0.1, 0.3])\}$$

$$\widetilde{\omega}_s^2 =$$

$$\{([H_3, H_4], [0.2, 0.3]) & ([H_4, H_6], [0.5, 0.7]) & ([H_3, H_4], [0.3, 0.5]) & ([H_3, H_5], [0.2, 0.4]) & ([H_1, H_3], [0.3, 0.6]) & ([H_5, H_6], [0.5, 0.7]) & ([H_3, H_5], [0.4, 0.6])\}$$

$$\widetilde{\omega}_s^3 =$$

$$\{([H_5, H_6], [0.1, 0.2]) & ([H_4, H_6], [0.2, 0.3]) & ([H_2, H_3], [0.1, 0.2]) & ([H_4, H_6], [0.5, 0.6]) & ([H_4, H_5], [0.4, 0.7]) & ([H_4, H_6], [0.5, 0.6]) & ([H_3, H_4], [0.2, 0.3])\}$$

$$\widetilde{\omega}_s^4 =$$

$$\{([H_3, H_4], [0.7, 0.8]) & ([H_4, H_5], [0.4, 0.5]) & ([H_3, H_4], [0.2, 0.4]) & ([H_5, H_6], [0.3, 0.5]) & ([H_4, H_6], [0.4, 0.6]) & ([H_3, H_5], [0.5, 0.8]) & ([H_3, H_4], [0.2, 0.4])\}$$

以 $\widetilde{\omega}_{s1}^1 = ([H_5, H_6], [0.4, 0.6])$ 为例,是指人

员 1 对指标 1 的评价为 $H_5 \sim H_6$, 该评价的灰度为 0.4 ~ 0.6; 即, 第 1 名设计员评价“匹配程度”这项指标“重要”或“很重要”, 同时该人员的不可信度 40% 至 60%。

由式(8)集结,得群体主观权重

$$\omega_s = \{0.152, 0.172, 0.100, 0.158, 0.127, 0.173, 0.118\}$$

将主客观权重视为同等重要, 设置 $\theta = 0.5$, 由式(14)得综合权重

$$\omega = \{0.182, 0.144, 0.104, 0.169, 0.129, 0.189, 0.082\}$$

根据群体决策矩阵和综合权重,由式(8)得各工作类型的 IGUL 变量评价

时拆修”产生的维修费用“低”或“很低”, 同时该人员的不可信度 10% 至 20%。

由式(8)集结,得群体决策矩阵 \widetilde{A}

$$\omega_o =$$

$$\{0.211, 0.117, 0.108, 0.180, 0.132, 0.205, 0.047\}$$

收集设计员对各指标带主观偏好的评价

$$\widetilde{G}_1 = ([H_{0.13}, H_{0.18}], [0.6, 0.7])$$

$$\widetilde{G}_2 = ([H_{0.09}, H_{0.14}], [0.6, 0.9])$$

$$\widetilde{G}_3 = ([H_{0.08}, H_{0.14}], [0.8, 0.9])$$

最后,求得各工作类型的综合评价 $G_1 = 0.1295, G_2 = 0.099, G_3 = 0.093$ 。据此对工作类型排序 $x_1 > x_2 > x_3$, 即“定时拆修”最优。根据实例,优化方法可得到备选工作类型排序,具备可行性。下文进一步验证优化方法的有效性。

分别设置 \widetilde{A}_{16}^1 的模部从 H_0 到 H_6 , 灰部从 0 到 1, 观察群体决策矩阵中集结值 \widetilde{A}_{16} 变化趋势分别如图 1, 2 所示。设计员评价越高, 模部越大, 集结值相应增大; 设计员越不可信, 灰部越大, 集结值相应减小。

设置评价为极差值 $([H_0, H_0], [0, 0])$, 3 种

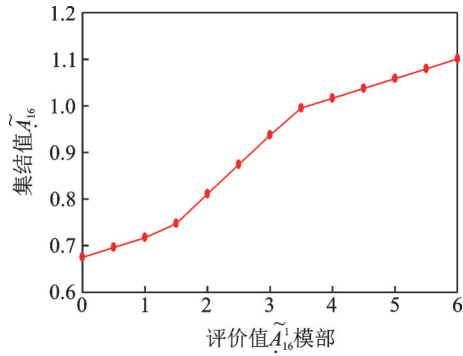


图1 集结值随评价值模糊部变化趋势

Fig.1 Curve of aggregation value changing with fuzzy part of evaluation value

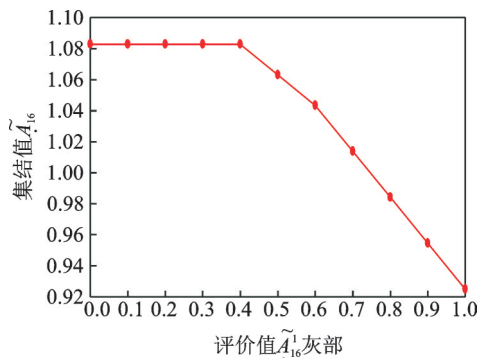


图2 集结值随评价值灰部变化趋势

Fig.2 Curve of aggregation value changing with grey part of evaluation value

算子集结值差异如表2所示。IGUL-HWA算子集结值减少37.98%，IGUL-WA算子集结值减少42.27%，IGUL-OWA算子集结值减少17.39%。由此可知，当群体中存在过优或过差的极端评价时，IGUL-WA算子受影响最大；IGUL-OWA算子虽受影响最小，但其忽略了评价信息自身的重要程度；IGUL-HWA算子可针对性的向过大和过小的评价值分配较小的权重，从而减小极端值的影响。

对比指标的主观权重 ω_s 和综合权重 ω ，如表3所示。权重集结后，“匹配程度”和“维修难度”权重值变大。原因为关于该两项指标的评价差异较大，评价中包含了较多的工作类型优劣信息；因此该两项指标在客观权重中被赋予较大的值，使经修正得到的综合权重在顾及主观偏好的同时更客观合理。

根据以上分析，优化方法具备有效性。在该军机上进一步应用本文方法，累计优化了192项初始维修任务的工作类型(25项维修深度增加、167项维修深度减小)。其中，维修深度减小的主要为电子设备，分析其原因为：电子设备装机数量多，且修理附加值高，深度维修会产生巨大的费用；电子设

表2 极端值影响下算子集结值差异

Table 2 Difference of aggregation values under the influence of extreme value

	设置前	设置后
\tilde{A}_{16}^1	$([H_5, H_6], [0.1, 0.2])$	$([H_0, H_0], [0, 0])$
\tilde{A}_{16}^2	$([H_5, H_6], [0.2, 0.3])$	$([H_5, H_6], [0.2, 0.3])$
\tilde{A}_{16}^3	$([H_4, H_5], [0.4, 0.6])$	$([H_4, H_5], [0.4, 0.6])$
\tilde{A}_{16}^4	$([H_5, H_6], [0.4, 0.5])$	$([H_5, H_6], [0.4, 0.5])$
IGUL-	$([H_{1.14}, H_{1.39}], [0.4, 0.6])$	$([H_{0.71}, H_{0.86}], [0.4, 0.6])$
HWA	$G = 1.0849$	$G = 0.6729$
IGUL-	$([H_{4.70}, H_{5.70}], [0.4, 0.6])$	$([H_{2.70}, H_{3.30}], [0.4, 0.6])$
WA	$G = 4.4578$	$G = 2.5733$
IGUL-	$([H_{4.88}, H_{5.88}], [0.4, 0.6])$	$([H_4, H_{4.88}], [0.4, 0.6])$
OWA	$G = 4.6098$	$G = 3.8080$

表3 指标的主观权重与综合权重差异

Table 3 Difference of weight values between subjective weights and comprehensive weights

权重	值	排序
ω_s	{0.152, 0.172, 0.100, 0.158, 0.127, 0.173, 0.118}	$c_6 > c_2 > c_4 > c_1 > c_5 > c_7 > c_3$
ω	{0.182, 0.144, 0.104, 0.169, 0.129, 0.189, 0.082}	$c_6 > c_1 > c_4 > c_2 > c_5 > c_3 > c_7$

备测试水平提升，可靠性提高，为减小深度提供了技术支撑。通过优化，电子设备以检查为主维修，避免了过度维修，缩短了维修周期，节省了维修费用。由此可见，方法的应用使维修任务更科学合理。据统计，应用本文方法后，该军机维修周期缩短37%、维修费用减少34%。

4 结 论

飞机维修任务工作类型的优化，实质是一种兼具模糊性与灰色性的特殊多指标群决策过程。针对问题特殊性，本文引入IGUL变量进行研究：

(1) 基于IGUL变量，提出军机维修任务工作类型评价指标和决策模型，构成了工作类型优化方法，为解决模糊、灰色问题提供了可行、有效的办法。同时，使用混合加权的集结算子，有效削弱了极端评价的影响；使用综合主客观信息的指标赋权方法，既考虑了主观偏好又充分利用了客观信息。

(2) 应用优化方法优化了某军机192项维修任

的工作类型,优化后的维修任务更科学合理,优化方法产生了显著的军事、经济效益。

参考文献:

- [1] EASA. Evolution/optimization guidelines: IMRBPB Issue Paper 44(Issue 3)[S]. Cologne: EASA, 2011.
- [2] ASD. International specification for developing and continuously improving preventive maintenance: S4000P-B6865-04000-00 (Issue No. 2.0) [S]. Brussels: ASD, 2018.
- [3] WANG Y X, YANG H, JIA B H, et al. Research on the maintenance task interval optimization of civil aircraft hidden function system based on Weibull distribution[J]. Hydromechanics Engineering, 2016, 44(6): 40-45.
- [4] 贾宝惠, 刘彦波, 卢翔, 等. 低利用率下民机结构维修间隔确定模型[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 215-225.
JIA Baohui, LIU Yanbo, LU Xiang, et al. Model for determining maintenance intervals of aircraft structural with low utilization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 215-225.
- [5] 蓝元沛, 孟庆春, 李锋, 等. 基于多属性效用理论的飞机设计选材方法[J]. 航空材料学报, 2010, 30(3): 88-94.
LAN Yuanpei, MENG Qingchun, LI Feng, et al. Aircraft design material-selection method based on MAUT theory[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(3): 88-94.
- [6] ZHAO Suozhu, YANG Wei, LI Jun, et al. Aircraft concept evaluation and effectiveness-based decision-making[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 30(1): 8-16.
- [7] ZHA Shanshan, GUO Yu, HUANG Shaohua, et al. A hybrid MCDM approach based on ANP and TOPSIS for facility layout selection[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 35(6): 1027-1037.
- [8] 王体春, 陈炳发, 卜良峰. 基于信息公理的大型水轮机方案设计多属性优选模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(6): 822-826.
WANG Tichun, CHEN Bingfa, BU Liangfeng. Multi-attribute optimal selection model of large-scale hydraulic turbine scheme design based on information axiom[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 43(6): 822-826.
- [9] 韩二东, 郭鹏, 赵静. 区间灰色不确定语言多属性群决策方法[J]. 计算机科学与探索, 2016, 10(1): 93-102.
HAN Erdong, GUO Peng, ZHAO Jing. Method for multi-attribute group decision making based on interval grey uncertain linguistic information[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2016, 10(1): 93-102.
- [10] 刘培德, 张新. 一种基于区间灰色语言变量几何加权集成算子的多属性群决策方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(5): 743-747.
LIU Peide, ZHANG Xin. Multi-attribute group decision making method based on interval grey linguistic variables weighted geometric aggregation operator[J]. Control and Decision, 2011, 26(5): 743-747.
- [11] 张媛, 覃剑, 王谦, 等. 基于区间数灰色模糊综合评判的继电保护维修决策方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 16-21.
ZHANG Yuan, QIN Jian, WANG Qian, et al. Research on maintenance decision-making method of relay protection based on interval numbers grey fuzzy comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 16-21.
- [12] HERRERA F, HERRERA-VIDEOMA E. Linguistic decision analysis: Steps for solving decision problems under linguistic information[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 115(1): 67-82.
- [13] XU Z S. A note on linguistic hybrid arithmetic averaging operator in multiple attribute group decision making with linguistic information[J]. Group Decision and Negotiation, 2006, 15(6): 593-604.
- [14] 陈大为. 灰色模糊集合引论[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1994.
CHEN Dawei. Introduction to the gray fuzzy sets[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1994.
- [15] 王坚强, 吴建文. 基于区间灰色不确定语言的多准则决策方法[J]. 中国管理科学, 2010, 18(3): 107-111.
WANG Jianqiang, WU Jianwen. Multi-criteria decision-making approach based on the interval grey uncertain linguistic[J]. Chinese Journal of Management Science, 2010, 18(3): 107-111.
- [16] YAGER R R. OWA aggregation over a continuous interval argument with applications to decision making [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part B Cybernetics, 2004, 34(5): 1952-1963.
- [17] 徐泽水. 区间直觉模糊信息的集成方法及其在决策中的应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(2): 215-219.
XU Zeshui. Methods for aggregating interval-valued intuitionistic fuzzy information and their application to decision making[J]. Control and Decision, 2007, 22(2): 215-219.
- [18] 李遥, 陈晔, 廖勇, 等. 一种多属性主客观对比评价模型及应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(1): 104-112.