

doi: 10.7690/bgzdh.2018.11.010

一种具有属性优先级的装备重要功能单元确定方法

席启超^{1,2}, 曹继平¹, 陈桂明¹, 孟岩磊¹, 王 赛¹

(1. 火箭军工程大学装备管理工程系, 西安 710025; 2. 中国人民解放军 96717 部队, 浙江 金华 321006)

摘要: 为了对确定装备重要功能单元进行辅助决策, 针对现有确定装备重要功能单元方法的不足, 介绍了区间数多指标决策问题, 结合各属性指标的优先性, 对传统的区间数 TOPSIS 方法进行改进, 提出了一种考虑属性优先级的区间数 TOPSIS 方法来确定装备重要功能单元。实例应用结果表明: 该方法既能保证确定重要功能单元的客观性, 又能反映不同决策的风险程度, 同时, 该方法运算简单, 易于计算机编程实现, 具有较强的应用性和推广性。

关键词: TOPSIS; 区间数; 重要功能单元; 属性优先; 理想点

中图分类号: TJ39 **文献标志码:** A

A Determining Functionally Significant Item Method of Equipment Based on Attribute Priority

Xi Qichao^{1,2}, Cao Jiping¹, Chen Guiming¹, Meng Yanlei¹, Wang Sai¹

(1. Department of Equipment Management, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. No. 96717 Unit of PLA, Jinhua 321006, China)

Abstract: In order to assist making decision of determining the functionally significant items of the equipment, aiming at the shortcomings of the existing methods, the interval number multiple index decision problem is introduced. In combination with the priority of each attribute index, the traditional interval number TOPSIS method is improved. An interval number TOPSIS method with attribute priority is proposed to determine the functionally significant items of the equipment. The test results show that this method can guarantee the objectivity of the functionally significant items and reflect the degree of risk of different decision-making. At the same time, the method calculation is simple and the method is easy to implement computer program, and has strong application and popularization.

Keywords: TOPSIS; interval number; functionally significant item; attribute priority; ideal point

0 引言

确定重要功能单元(functionally significant items, FSI)是以可靠性为中心的维修分析(reliability centered maintenance analysis, RCMA)的首要步骤。传统确定 FSI 的过程是一个比较粗略、快速且偏于保守的分析过程, 通常依靠工程技术人员的经验和判断力^[1]。不同人员的判断就会出现差异, 并且, 当对装备进行 RCMA 不能确定是否为 FSI 时, 就保守地把该功能单元作为 FSI, 这就给后续的可靠性分析增加了不必要的工作量; 因此, 一些学者引入相关模型进行辅助决策 FSI^[2-5], 他们多数将确定 FSI 的指标作为确定值进行处理, 且对各指标之间的优先关系考虑不够, 存在很大的主观盲目性。由于 FSI 的各指标往往来自专家判断且具有时间波动性, 不完备性和不确定性比较显著, 所以用区间数的形式表示指标信息将更为合理有效。笔者考虑各属性指标的优先性, 把改进的多属性决策

逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)与区间数相结合, 建立了一种新的确定重要功能单元的方法。

1 区间数多指标决策问题的描述

1.1 区间数的定义

设 R 为实数域, 称闭区间 $[a^L, a^U]$ 为区间数, 用 \tilde{a} 表示。其中: a^L 为区间数的下确界; a^U 为区间数的上确界, $a^L, a^U \in R$, $a^L \leq a^U$, 当 $a^L = a^U$ 时, 区间数 \tilde{a} 退化为实数^[6-7]。

笔者用以下符号表示区间数多指标决策问题的集和量:

$F = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ 为 m 个备选方案的集和;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 为 n 个指标的集和;

$\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 为 n 个指标的权重集。

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(71601180)

作者简介: 席启超(1986—), 男, 江苏人, 硕士, 从事装备管理与综合保障研究。

1.2 区间数的运算法则

1) 正闭区间数 \tilde{a} 、 \tilde{b} 的运算法则由下式^[7]给出:

$$\tilde{a} + \tilde{b} = [a^L + b^L, a^U + b^U];$$

$$\tilde{a} \times \tilde{b} = [a^L b^L, a^U b^U];$$

$$\tilde{a} \div \tilde{b} = [a^L / b^U, a^U / b^L];$$

$$k\tilde{a} = [ka^L, ka^U], k > 0;$$

$$1/\tilde{a} = [1/a^U, 1/a^L]$$

2) 区间数的距离(曼哈顿距离)^[8]:

$$d_{MD} = \|\tilde{a} - \tilde{b}\| = |a^L - b^L| + |a^U - b^U|,$$

特别当 $\|\tilde{a} - \tilde{b}\| = 0$ 时, $\tilde{a} = \tilde{b}$ 。

3) 区间数的规范化方法^[9]:

首先, 通过式(1)将属性中的成本型转化为效益型; 然后, 采用基于极差变换法的规范化式(2)对初始区间数决策矩阵进行规范化, 区间数 $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 规范化后记为 $\tilde{r}_{ij} = [r_{ij}^L, r_{ij}^U]$ 。

$$\left. \begin{aligned} a_{ij}^L &= \max_i \{a_{ij}^U\} - \alpha_{ij}^U \\ a_{ij}^U &= \max_i \{a_{ij}^L\} - \alpha_{ij}^L \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} r_{ij}^L &= \frac{\alpha_{ij}^L - \min_i \{a_{ij}^L\}}{\max_i \{a_{ij}^U\} - \min_i \{a_{ij}^L\}} \\ r_{ij}^U &= \frac{\alpha_{ij}^U - \min_i \{a_{ij}^L\}}{\max_i \{a_{ij}^U\} - \min_i \{a_{ij}^L\}} \end{aligned} \right\}。 \quad (2)$$

2 考虑属性优先级的区间数 TOPSIS 方法

对传统区间数 TOPSIS 方法^[10-11]进行改进, 并结合各属性指标的优先性, 给出考虑属性优先级的区间数 TOPSIS 方法, 具体步骤如下:

1) 规范化初始区间数决策矩阵。将初始区间数决策矩阵 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{m \times n}$, 通过式(1)、式(2)转化为规范化区间数决策矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{m \times n}$ 。

2) 确定规范化决策矩阵各属性 C_j 的权重^[12]。采用高级属性效用值的乘积表示低级属性的权重。

定义区间数:

$$T_{ij} = [T_{ij}^L, T_{ij}^U] =$$

$$\left\{ \begin{aligned} &[1, 1] \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1。 \\ &T_{i(j-1)} \tilde{a}_{i(j-1)} = [T_{i(j-1)}^L a_{i(j-1)}^L, T_{i(j-1)}^U a_{i(j-1)}^U] = \\ &[\prod_{k=1}^{j-1} a_{ik}^L, \prod_{k=1}^{j-1} a_{ik}^U], i = 1, 2, \dots, m; j = 2, \dots, n。 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

为了得到点值的属性权重, 引入决策者风险态度因子 ε , 将区间数权重转化为点值权重, 具体表述为:

$$\mu_{ij} = 0.5(T_{ij}^U + T_{ij}^L) + \varepsilon(T_{ij}^U - T_{ij}^L), i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

保守型决策者取 $-0.5 \leq \varepsilon < 0$, 中立型决策者取 $\varepsilon = 0$, 风险型决策者取 $0 < \varepsilon \leq 0.5$, 一般情况下风险态度因子由决策者事先给出。

通过式(4)的转化, 方案 F_i 在属性 C_j 下的规范化权重为:

$$\omega_{ij} = \mu_{ij} / \sum_{k=1}^n \mu_{ik}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n。 \quad (5)$$

3) 构造加权规范化决策矩阵。

$$\tilde{Y} = (\tilde{y}_{ij})_{m \times n} = (\omega_{ij} \tilde{r}_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n。 \quad (6)$$

4) 确定正理想解 $\tilde{y}^+ = (\tilde{y}_1^+, \tilde{y}_2^+, \dots, \tilde{y}_n^+)$ 和负理想解 $\tilde{y}^- = (\tilde{y}_1^-, \tilde{y}_2^-, \dots, \tilde{y}_n^-)$, 正理想解为所有指标值最大的解, 负理想解为所有指标值最小的解。其中:

$$\tilde{y}_j^+ = [y_j^{+L}, y_j^{+U}] = [\max_{1 \leq i \leq m} (y_{ij}^L), \max_{1 \leq i \leq m} (y_{ij}^U)], j = 1, 2, \dots, n; \quad (7)$$

$$\tilde{y}_j^- = [y_j^{-L}, y_j^{-U}] = [\min_{1 \leq i \leq m} (y_{ij}^L), \min_{1 \leq i \leq m} (y_{ij}^U)], j = 1, 2, \dots, n。 \quad (8)$$

5) 计算每个解到正理想解和负理想解的距离分别为 d_i^+ 、 d_i^- :

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n \|\tilde{y}_{ij} - \tilde{y}_j^+\| = \sum_{j=1}^n (|y_{ij}^L - y_j^{+L}| + |y_{ij}^U - y_j^{+U}|),$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad (9)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n \|\tilde{y}_{ij} - \tilde{y}_j^-\| = \sum_{j=1}^n (|y_{ij}^L - y_j^{-L}| + |y_{ij}^U - y_j^{-U}|),$$

$$i = 1, 2, \dots, m。 \quad (10)$$

6) 计算每个解对理想解的贴近度。

$$c_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = 1, 2, \dots, m。 \quad (11)$$

7) 排列方案的优先次序。按 c_i 由大到小的顺序排列, 重要度依次递减, $c_i (i=1, 2, \dots, m)$ 愈接近 1, 表示该功能单元越重要; 反之, 愈接近 0, 表示该功能单元越不重要。

3 确定某型装备重要功能单元的应用

3.1 建立产品结构树

某型发射车单级主减速器是机动发射系统的重

要部件之一，为确定单级主减速器的重要功能单元，建立其产品结构树如图 1 所示。

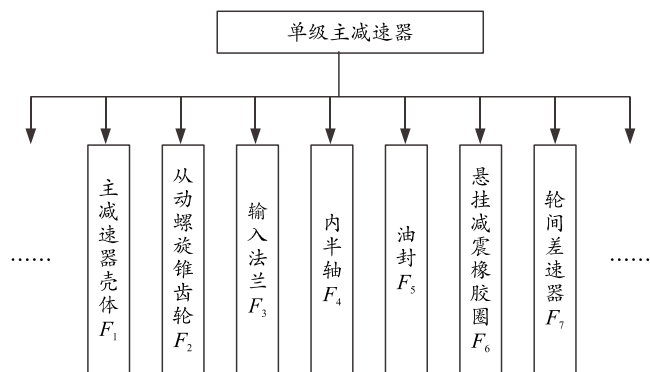


图 1 产品结构树

3.2 确定装备重要功能单元的评价指标

结合某型发射车的相关参数及故障、维修和费用等信息，确定了对装备重要功能单元影响的主要指标，包括安全性、任务性、可靠性、经济性、维修性、检测性，且这 6 个指标的优先级依次递减。

1) 安全性(C₁)。

故障可能影响安全，造成人员伤亡或对装备安全产生影响。根据故障后果对人员和装备安全的影响程度评级，分为 4 个等级，如表 1 所示，专家评分范围可以跨越相邻等级。

表 1 故障对安全性影响评分等级

序号	严重程度	评分
1	造成人员伤亡，装备报废	0
2	造成人员重伤，装备严重受损	1~4
3	造成人员轻伤，装备轻微受损	5~9
4	未造成人员伤亡，装备损坏	10

2) 任务性(C₂)。

故障对装备担负任务的影响，从故障后果对装备完成任务的影响程度分 4 个等级，如表 2 所示，专家评分区间数可以跨越相邻等级。

表 2 故障对任务性影响评分等级

序号	严重程度	评分
1	不影响任务完成	0
2	影响任务顺利完成，但未产生其他影响	1~4
3	造成任务延误或降级	5~9
4	故障造成任务失败	10

3) 可靠性(C₃)。

以产品可靠度衡量，范围为 0~1，数值越大表明产品越可靠。

4) 经济性(C₄)。

故障造成经济损失的程度，以故障消耗的备件

费、人工工时费以及故障造成的其他所有经济损失，损失费用多少衡量，费用消耗范围以 0~10 衡量(如本例费用单位为百元)，损失费用越少越好。

5) 维修性(C₅)。

故障后能按时完成维修工作的程度，衡量产品的复杂程度、可维修程度，主要根据产品维修的工时进行评价，维修工时越少越好，如表 3 所示，专家评分区间数可以跨越相邻等级。

表 3 故障对维修性影响评分等级

序号	维修工时/h	评分
1	>15	1
2	5~14	2~5
3	1~4	6~9
4	<1	10

6) 检测性(C₆)。

检测性是装备维修单元重要度的因素之一，主要包括检测技术要求的难易程度和检测费用 2 方面。如表 4 所示，检测性越高越好。

表 4 故障对检测性影响评分等级

序号	可检测程度	评分
1	技术要求高，检测费用多	1~2
2	技术要求低，检测费用多	3~5
3	技术要求高，检测费用少	6~8
4	技术要求低，检测费用少	9~10

指标属性权重存在 $C_1 > C_2 > C_3 > C_4 > C_5 > C_6$ 的优先关系。对于确定重要功能单元而言， C_1 、 C_3 、 C_5 、 C_6 为成本型指标， C_2 、 C_4 为效益型指标。

3.3 进行分析决策

1) 根据图 1 单级主减速器系统的结构树，决策者根据评价指标进行打分分级，构建如表 5 的初始区间数决策矩阵。

2) 通过式(1)和式(2)对初始区间数决策矩阵进行规范化，结果如表 6 所示。

3) 首先根据效用值理论，由式(3)建立区间数矩阵表 7，然后由式(4)、式(5)确定当决策者为中立型时(即 $\varepsilon = 0$)，各属性指标权重，如表 8 所示。

4) 根据式(6)建立加权规范化决策矩阵，如表 9 所示。

5) 根据式(7)和式(8)解出区间型正负理想解分别为：

$$\tilde{y}^+ = ([0.183, 0.406], [0.132, 0.187], [0.024, 0.173], [0.11, 0.135], [0.047, 0.09], [0.01, 0.039]);$$

$$\tilde{y}^- = ([0, 0.152], [0, 0.009], [0, 0.002], [0, 0], [0, 0],$$

[0,0]。

6) 根据式(9)和式(10)解出各产品与正理想解的距离为 $d^+=[1.142, 1.129, 0.789, 0.247, 0.679, 1.374, 0.38]$, 与负理想解的距离为 $d^-=[0.232, 0.246, 0.586, 1.127, 0.695, 0.000 2, 0.994]$ 。

7) 根据式(11)计算出每个解对理想解的贴近度 $C=[0.169, 0.179, 0.426, 0.82, 0.506, 0.000 2, 0.723]$, 各产品排序结果为 $F_4 > F_7 > F_5 > F_3 > F_2 > F_1 > F_6$, F_4 和 F_7 的贴近度远大于其他产品, 即内半轴和轮间差速器为重要功能单元。

表 5 初始区间数决策矩阵 \tilde{A}

\tilde{A}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
F_1	[9.0, 9.8]	[2.0, 3.5]	[0.95, 0.99]	[7.0, 9.0]	[5.5, 7.0]	[9.5, 10.0]
F_2	[9.2, 9.7]	[3.0, 4.0]	[0.8, 0.95]	[0.7, 2.5]	[6.5, 7.5]	[1.5, 3.5]
F_3	[8.0, 9.5]	[4.0, 5.0]	[0.9, 0.98]	[1.5, 3.0]	[8.8, 9.8]	[9.0, 9.8]
F_4	[7.0, 9.0]	[7.0, 9.5]	[0.5, 0.95]	[7.0, 8.5]	[6.5, 8.5]	[6.0, 9.0]
F_5	[8.0, 9.0]	[4.0, 5.0]	[0.7, 0.96]	[0.2, 0.5]	[7.0, 8.5]	[5.5, 8.5]
F_6	[9.5, 10.0]	[1.0, 2.0]	[0.9, 0.98]	[0.5, 0.6]	[8.5, 9.5]	[9.0, 9.8]
F_7	[7.5, 9.5]	[7.0, 9.0]	[0.7, 0.92]	[8.0, 9.0]	[4.5, 7.0]	[7.0, 9.0]

表 6 规范化决策矩阵 \tilde{R}

\tilde{R}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
F_1	[0.067,0.333]	[0.118,0.294]	[0,0.082]	[0.773,1]	[0.528,0.811]	[0,0.059]
F_2	[0,0.1,0.267]	[0.235,0.353]	[0.082,0.388]	[0.057,0.261]	[0.434,0.623]	[0.765,1]
F_3	[0.167,0.667]	[0.353,0.471]	[0.02,0.184]	[0.148,0.318]	[0,0.189]	[0.024,0.118]
F_4	[0.333,1]	[0.706,1]	[0.082,1]	[0.773,0.943]	[0.245,0.623]	[0.118,0.471]
F_5	[0.333,0.667]	[0.353,0.471]	[0.061,0.592]	[0,0.034]	[0.245,0.528]	[0.176,0.529]
F_6	[0,0.167]	[0,0.118]	[0.02,0.184]	[0.034,0.045]	[0.057,0.245]	[0.024,0.118]
F_7	[0.167,0.833]	[0.706,0.941]	[0.143,0.592]	[0.886,1]	[0.528,1]	[0.118,0.353]

表 7 T_{ij} 的值

T_{ij}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
F_1	[1, 1]	[0.067,0.333]	[0.008,0.098]	[0,0.008]	[0,0.008]	[0,0.006]
F_2	[1, 1]	[0.1,0.267]	[0.024,0.094]	[0.002,0.036]	[0,0.01]	[0,0.006]
F_3	[1, 1]	[0.167,0.667]	[0.059,0.314]	[0.001,0.058]	[0,0.018]	[0,0.003]
F_4	[1, 1]	[0.333,1]	[0.235,1]	[0.019,1]	[0.015,0.943]	[0.004,0.587]
F_5	[1, 1]	[0.333,0.667]	[0.118,0.314]	[0.007,0.186]	[0,0.006]	[0,0.003]
F_6	[1, 1]	[0,0.167]	[0,0.02]	[0,0.004]	[0,0]	[0,0]
F_7	[1, 1]	[0.167,0.833]	[0.118,0.784]	[0.017,0.464]	[0.015,0.464]	[0.008,0.464]

表 8 $\varepsilon=0$ 时各方案属性的权重值

ω_j	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
F_1	0.791	0.158	0.042	0.003	0.003	0.003
F_2	0.788	0.144	0.046	0.015	0.004	0.002
F_3	0.609	0.254	0.113	0.018	0.006	0.001
F_4	0.28	0.187	0.173	0.143	0.134	0.083
F_5	0.55	0.275	0.119	0.053	0.002	0.001
F_6	0.913	0.076	0.009	0.002	0	0
F_7	0.375	0.187	0.169	0.09	0.09	0.088

表 9 加权规范化决策矩阵 \tilde{Y}

\tilde{Y}	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
F_1	[0.053,0.264]	[0.019,0.047]	[0,0.003]	[0.002,0.003]	[0.002,0.003]	[0,0]
F_2	[0.079,0.21]	[0.034,0.051]	[0.004,0.018]	[0.001,0.004]	[0.002,0.002]	[0.002,0.002]
F_3	[0.101,0.406]	[0.089,0.119]	[0.002,0.021]	[0.003,0.006]	[0,0.001]	[0,0]
F_4	[0.093,0.28]	[0.132,0.187]	[0.014,0.173]	[0.11,0.135]	[0.033,0.084]	[0.01,0.039]
F_5	[0.183,0.367]	[0.097,0.129]	[0.007,0.07]	[0,0.002]	[0,0.001]	[0,0]
F_6	[0,0.152]	[0,0.009]	[0,0.002]	[0,0]	[0,0]	[0,0]
F_7	[0.062,0.312]	[0.132,0.176]	[0.024,0.1]	[0.08,0.09]	[0.047,0.09]	[0.01,0.031]

同理, 可以计算出决策者为保守型时, 如 $\varepsilon=-0.3$, 每个解对理想解的贴近度 $C=[0.177, 0.178, 0.468, 0.886, 0.559, 0.000 1, 0.731]$; 当决策者为风险型时, 如 $\varepsilon=0.3$, 每个解对理想解的贴近度

$C=[0.165, 0.183, 0.403, 0.79, 0.475, 0.000 3, 0.722]$, 同样可知内半轴和轮间差速器为重要功能单元。从决策结果看, 本例决策者的风险态度因子对决策的结果影响不大。

4 结束语

笔者针对确定装备 FSI 过程中属性指标的优先性, 提出考虑属性优先级的区间数 TOPSIS 方法。该方法在指标评价方面用区间数表示属性评价范围, 避免了因专家评价意见不一致导致评价结果存在的盲目性; 在属性权重确定方面, 克服了传统恒定指标权重的缺陷, 利用效用值理论充分考虑了指标权重的不确定性; 在初始区间数决策矩阵规范化方面运用极差变换思想, 保证了规范化矩阵的单调性、平移不变性和区间稳定性等性质, 保持了初始区间数决策矩阵蕴含的重要信息。

该方法运算简单, 易于计算机编程实现, 应用性和推广性较强, 可以用来解决其他具有属性优先性、属性指标值为区间数且指标权重不确定类型问题的决策。

参考文献:

- [1] 甘茂志, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 273-290.
- [2] 俞金松, 程继红, 张国. 基于重要度评价的导弹 FSI 确定方法[J]. 海军航空工程学院学报(军事版), 2013, 30(3): 77-81.
- [3] 咎翔, 张仕新, 韩朝帅, 等. 一种关于重要功能产品的

(上接第 37 页)

5 结论

实验结果表明: 采用环形耦合和神经网络自组织模糊控制结合的控制策略, 能有效改善冲击载荷影响下电机运行的稳定性, 保证多台电机运行时具有很高的同步性, 满足该收集装置的工作要求, 对改善该系统的响应速度和鲁棒性、保证模块药收集过程中精确安全具有重要作用。同时, 该控制策略可以应用于其他面临冲击载荷的多电机传送系统, 具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 董佳, 齐向东, 王元友, 等. 模糊 PID 技术在架车机举升单元同步控制中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2015(2): 191-193.
- [2] 刘然, 孙建忠, 罗亚琴, 等. 多电机滑模环形耦合同步控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2010(22): 2662-2665.
- [3] 曹玲芝, 李春文, 牛超, 等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 586-592.
- [4] YEH S S, HSU P L. Analysis and design of integrated control for multi-axis motion systems[J]. IEEE

定量分析方法[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(8): 69-83.

- [4] 唐彦峰, 闫旭, 封会娟, 等. 基于熵权正交投影的重要功能产品确定方法[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(1): 31-34.
- [5] 吴坤, 康建设, 杨东. 基于熵权可拓理论的雷达发射机关键件判别研究[J]. 军械工程学院学报, 2015, 27(1): 10-14.
- [6] 李永义, 周正华, 李伯权, 等. 基于区间数可能度的地震应急物资分配优化方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(3): 637-643.
- [7] 罗承忠. 模糊集引论: 上册[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1989: 197-199.
- [8] 李晓威, 顾海鹏, 柏明星. 基于区间数的 TOPSIS 方法在水驱油田开发效果评价上的应用[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(19): 171-177.
- [9] 胡明礼, 范成贤, 史开泉. 区间数决策矩阵规范化方法的性质分析[J]. 计算机科学, 2013, 40(10): 203-207.
- [10] 尤天慧, 樊治平. 区间数多指标决策的一种 TOPSIS 方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(9): 840-843.
- [11] 张辽宁, 屈洋, 张政, 等. 基于技术检测的装甲装备武器系统执行任务能力评估[J]. 兵工自动化, 2016, 35(7): 74-76.
- [12] 陶长琪, 凌和良. 属性具有线性优先级的区间数多属性决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(4): 177-185.

Transactions on Control System Technology, 2003, 11(3): 375-382.

- [5] 林松润, 李军, 林嘉义. 基于电子虚拟总轴的舞台机械控制系统多电机同步控制[J]. 工业控制计算机, 2015(7): 47-49.
- [6] 张今朝, 刘国海, 潘天红. 多电机同步系统的多模型辨识[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 138-142.
- [7] 谷雨, 马钱. 基于加权交叉耦合的多电机同步控制研究[J]. 电气传动, 2015, 45(9): 58-61.
- [8] 颜昌彬. 模糊 PID 在电机调速中的应用[J]. 无线互联科技, 2015(22): 137-138.
- [9] 王维斌, 王文琰, 毛海杰. 基于滑模与偏差耦合复合控制的舞台升降台同步控制方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(4): 3-7.
- [10] 葛红豆, 赫雷, 曹维清, 等. 基于模糊 PID 控制的 AGV 控制[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 76-79.
- [11] 张莉, 李彦明, 马培荪, 等. 基于模糊 PID 控制器的多电机同步控制装置的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2003(4): 11-13.
- [12] 司景萍, 马继昌, 牛家骅, 等. 基于模糊神经网络的智能故障诊断专家系统[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 164-171.