

# 基于 PLTS 的服务型制造设备维护决策方法研究

张永政, 叶春明<sup>†</sup>, 耿秀丽

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 在服务型制造背景下, 设备维护策略选择面临复杂性和不确定性, 这使得传统方法难以有效应对, 从而影响维护成本和设备可用性. 当前, 设备维护决策中的多指标评价信息往往具有模糊性和不确定性, 依赖传统方法难以提供科学、合理的维护方案. 针对这一问题, 引入概率语言术语集 (PLTS) 的分析模型, 提出 3 种基于概率语言术语集的加权幂平均算子, 用于整合指标权重已知和未知情况下的多指标的评价信息, 以有效应对维护决策中的不确定性和模糊性. 通过应用所提出方法, 验证其在服务型制造供应链设备维护策略选择中的可行性和有效性, 提供一种更科学的维护策略决策工具, 有助于提升维护成本的控制和设备的稳定性.

**关键词:** 服务型制造; 维护策略选择; 概率语言术语集; 集结算子; 多属性决策; 指标权重

**中图分类号:** TH122; N94 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.13195/j.kzyjc.2024.0927

**引用格式:** 张永政, 叶春明, 耿秀丽. 基于 PLTS 的服务型制造设备维护决策方法研究 [J]. 控制与决策.

## Research on maintenance decision-making methods for service-oriented manufacturing equipment based on PLTS

ZHANG Yong-zheng, YE Chun-ming<sup>†</sup>, GENG Xiu-li

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In the context of servitization in manufacturing, selecting equipment maintenance strategies involves significant complexity and uncertainty, making traditional methods often inadequate, which in turn affects maintenance costs and equipment availability. Currently, the multi-criteria evaluation information in maintenance decision-making is often characterized by fuzziness and uncertainty, making it challenging for traditional approaches to provide a scientific and well-grounded maintenance plan. To address this issue, this paper introduces an analysis model based on probabilistic linguistic term sets (PLTS) and proposes three weighted power average operators based on the PLTS to integrate multi-criteria evaluation information under both known and unknown criteria weights, effectively managing uncertainty and fuzziness in maintenance decisions. By applying the proposed methods, their feasibility and effectiveness in selecting maintenance strategies for servitized manufacturing supply chains are demonstrated, providing a more scientific tool for decision-making that helps improve cost control and enhance equipment stability.

**Keywords:** service-oriented manufacturing; maintenance strategy selection; probabilistic linguistic term sets; aggregate operator; multi-attribute decision-making; criteria weights

## 0 引言

在新一轮工业革命背景下, 服务型制造已成为全球趋势. 我国虽然是制造业大国, 但是多集中于低端制造, 竞争力不足, 亟需调整产业结构, 增强核心竞争力.

中国制造业面临巨大挑战, 规模虽然庞大但是整体竞争力弱, 处于全球价值链低端. 在新的经济常态下, 中国正处于产业结构调整的战略期间<sup>[1]</sup>. 服务

型制造是转型升级的重要方向, 服务制造商需要确保设备正常运行, 管理不善会导致设备故障, 造成经济损失, 而维护成本过高又易导致浪费. 因此, 如何选择合理的设备维护策略对于服务制造商尤为重要.

在运维策略选择方面, 学者们做了诸多研究. 戴勇<sup>[2]</sup>设计了规避服务型制造策略运维过程中合同签订可能产生的风险, 忽略了设备故障等因素带来的风险; March 等<sup>[3]</sup>结合物联网、大数据和预测分析,

收稿日期: 2024-08-03; 录用日期: 2024-11-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71840003, 72271164).

责任编委: 徐泽水.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: yechm6464@163.com.

本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

通过实时数据和算法动态管理预防性维护策略,但是对数据质量和算力要求较高;Chang等<sup>[4]</sup>提出了多方维护分组策略,开发并行算法求解 Stackelberg-Nash 均衡,需要准确建模,实践存在协调难题;Jiang等<sup>[5]</sup>提出了服务型制造的设备维护策略,包括产品可靠性设计、库存管理和修护策略3方面;李强等<sup>[6]</sup>提出了出了设备运维的智能灰靶决策模型,用于选择最佳维护策略,但是在处理不确定性方面存在局限性,且权重和影响关系的确定具有主观性.

以上研究主要存在以下不足:1)不确定性处理不足:多数研究未能科学应对故障随机性、环境不确定性以及多指标关联性;2)多指标评估局限:维护策略多聚焦单一指标,未全面考虑成本、时间、可靠性等相互作用;3)模型复杂性高:难以协调多方合作,实际应用效果欠佳.

鉴于此,降低不确定性和复杂性影响,合理描述评估信息,构建适合的维护选择模型,对于服务型制造具有重要意义.为了解决这些问题,本文提出基于 PLTS 的广义加权幂平均算子 (GWPA),并在此基础上,提出广义有序加权幂平均 (GOWPA) 算子和广义幂有序加权平均算子 (GPOWA),用于整合评价信息,处理不确定性并消除冗余,在设备维护中有效应对多指标评估的复杂性.文献 [7-8] 分别在中智模糊和三角直觉模糊环境中讨论了加权幂平均算子,但是均是基于指数函数的,并非严格意义上的广义算子;文献 [9] 指出现有的有序集结算子大多基于半序关系,存在局限性.因此,本文基于 PLTS 的 GWPA 算子,并结合概率语言术语集的全序关系,提出基于 PLTS 的 GOWPA 算子和 GPOWA 算子,在处理信息不确定性、整合多源信息以及权衡指标权重方面优势明显,可提升设备维护策略评估的可靠性和适用性.

本文的主要内容如下:1)提出基于 PLTS 的分析模型,处理决策信息的不确定性和模糊性,评估维护策略;2)设计3种基于 PLTS 的加权幂平均算子,具有优良性质和更强普适性;3)综合多指标评价,弥补主观偏差与指标关联忽视问题,提升供应链设备维护决策的科学性和准确性.

## 1 基础理论

1) PLTS 的基本概念. Gou 等<sup>[10]</sup>提出了 PLTS 的对称形式.

**定义 1<sup>[10]</sup>** 设  $S = \{s_\alpha | \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$  为一组 LTS, 则一个 PLTS 可定义为

$$L(p) = \left\{ L^{(k)} p^{(k)} | L^{(k)} \in S, p^{(k)} \geq 0, k = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1 \right\}. \quad (1)$$

其中:  $L^{(k)} p^{(k)}$  表示  $L^{(k)}$  的概率为  $p^{(k)}$ ,  $\#L(p)$  为所有  $L(p)$  中包含的 LTS 个数.

**定义 2<sup>[11]</sup>** 令  $L(p) = \{L^{(k)} p^{(k)} | k = 1, 2, \dots, \#L(p)\}$  为一个 PLTS,  $r^{(k)}$  为  $L^{(k)}$  的下标, 则  $L(p)$  的得分函数如下所示:

$$E(L(p)) = S_{\bar{\alpha}}. \quad (2)$$

其中:  $\bar{\alpha} = \frac{\sum_{k=1}^{\#L(p)} r^{(k)} p^{(k)}}{\sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)}}$ ; 当  $E(L(p)_1) > E(L(p)_2)$  时,  $L(p)_1 > L(p)_2$ .

**定义 3<sup>[10]</sup>** 设  $L(p)_1$  和  $L(p)_2$  为两个 PLTSs,  $\nu$  为一个正实数,  $\eta_i^1 \in g(L_1(p)_1)$ ,  $\eta_j^2 \in g(L_2(p)_2)$ . 其中:  $i = 1, 2, \dots, \#L(p)_1$ ;  $j = 1, 2, \dots, \#L(p)_2$ .  $f(\cdot)^{-1}$  为  $f(\cdot)$  的反函数, PLTS 的运算规则如下所示:

$$\begin{aligned} f(\cdot) : [-\tau, \tau] &\rightarrow [0, 1], f(L_1(p)_1) = \\ &\left\{ \left( \frac{r^{(k)}}{2\tau} + \frac{1}{2} \right) p^{(k)} \right\} = \{r^{(k)} p^{(k)}\}, r \in [0, 1]; \\ f(\cdot)^{-1} : [0, 1] &\rightarrow [-\tau, \tau], f(f(L_1(p)_1))^{-1} = \\ &\{S_{(2r-1)\tau} p^{(k)} | r \in [0, 1]\} = L_1(p)_1. \end{aligned}$$

2) 概率语言广义幂平均算子的基本概念.

**定义 4<sup>[12]</sup>** 设  $L(p)_i = \left\{ L_i^{(k)} p_i^{(k)} | L_i^{(k)} \in S, p_i^{(k)} \geq 0, k = 1, 2, \dots, \#L(p), i = 1, 2, \dots, n, \sum_{k=1}^{\#L(p)} p_i^{(k)} \leq 1 \right\}$

为一组 PLTS 信息, 且 PLPA:  $\Omega^n \rightarrow \Omega$  为  $n$  维映射, 则有

$$\begin{aligned} \text{PLPA}(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = \\ \bigcup_{L_1(p)_1 \in L(p)_1, \dots, L_n(p)_n \in L(p)_n} \\ \frac{\bigoplus_{i=1}^n (1 + T(L_i(p)_i)) L_i(p)_i}{\bigoplus_{i=1}^n (1 + T(L_i(p)_i))}. \quad (3) \end{aligned}$$

其中:  $\Omega$  为 PLTS 的集合.  $T(L_i(p)_i) = \sum_{i=1, j \neq i}^n \text{Sup}(L_i(p)_i, L_j(p)_j)$ ,  $\text{Sup}(L_i(p)_i, L_j(p)_j)$  为  $L_i(p)_i$  和  $L_j(p)_j$  的支持度, 且包含以下性质:

1)  $\text{Sup}(L_i(p)_i, L_j(p)_j) \in [0, 1]$ ;

2)  $\text{Sup}(L_i(p)_i, L_j(p)_j) = \text{Sup}(L_j(p)_j, L_i(p)_i)$ ;

3) 若  $d(L_i(p)_i, L_j(p)_j) \leq d(L_l(p)_l, L_h(p)_h)$ , 则  $\text{Sup}(L(p)_i, L(p)_j) \geq \text{Sup}(L(p)_l, L(p)_h)$ .

则称 PLPA 为概率语言术语集幂平均算子.

## 2 概率语言术语集广义有序加权幂平均算子和广义幂有序加权平均算子

下面介绍所提出 PLGWPA 算子.

**定义 5** 设  $L(p)_i = \{L_i^{(k)}(p_i^{(k)}) | L_i^{(k)} \in S, p_i^{(k)} \geq 0, k=1, 2, \dots, \#L(p), i=1, 2, \dots, n, \sum_{k=1}^{\#L(p)} p_i^{(k)} \leq 1\}$

为一组 PLTS 信息, 权重向量为  $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ , 其中  $w_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^n w_i = 1$ , 则称

$$PLGWPA(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = \bigcup_{L_1(p)_1 \in L(p)_1, \dots, L_n(p)_n \in L(p)_n} \left\{ f \left( \frac{\bigoplus_{i=1}^n w_i (1 + T(L_i(p)_i)) f(L_i(p)_i)}{\sum_{i=1}^n w_i (1 + T(L_i(p)_i))} \right)^{-1} \right\} \quad (4)$$

为 PLGWPA 算子. 这里  $T(L_i(p)_i) = \sum_{i=1, j \neq i}^n \text{Sup}(L_i(p)_i, L_j(p)_j)$ .  $f(\cdot)^{-1}$  为  $f(\cdot)$  的反函数, 且有如下性质:

- 1)  $\forall x, y \in [0, p]$ , 若  $x \geq y$ , 则  $f(x) \geq f(y)$ ;
- 2)  $\forall x \in [0, p], f(x) \geq 0$ .

**注 1** 若  $f(x) = x$ , 则 PLGWPA 算子退化为概率语言术语集加权幂平均 (PLWPA) 算子.

**注 2** 若  $f(x) = x$ , 且  $i \neq j$  时,  $\text{Sup}(L(p)_i, L(p)_j) = k$ , 则 PLGWPA 算子退化为概率语言术语集加权平均 (PLWA) 算子.

**注 3** 很明显,  $x^\lambda$  为  $f(x)$  的特殊数学形式, 因此, 本节设定的 PLGWPA 算子比文献 [7-8] 定义的加权幂平均算子更具一般性.

**定义 6** 设  $L(p)_i = \{L_i^{(k)}(p_i^{(k)}) | L_i^{(k)} \in S, p_i^{(k)} \geq 0, k=1, 2, \dots, \#L(p), i=1, 2, \dots, n, \sum_{k=1}^{\#L(p)} p_i^{(k)} \leq 1\}$

为一组 PLTS 信息, 权重向量为  $(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ , 其中  $w_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^n w_i = 1$ . 若  $(L(p)_{\sigma(1)}, L(p)_{\sigma(2)}, \dots, L(p)_{\sigma(n)})$  为  $(nw_1 L(p)_1, nw_2 L(p)_2, \dots, nw_n L(p)_n)$  的一个排列, 这里  $L(p)_{\sigma(n)} \leq L(p)_{\sigma(n-1)} \leq \dots \leq L(p)_{\sigma(2)} \leq L(p)_{\sigma(1)}$ , 则概率语言术语集广义有序加权幂平均 (PLGOWPA) 算子的定义为

$$PLGOWPA(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = \bigcup_{L_{\sigma(1)}(p)_{\sigma(1)} \in L(p)_{\sigma(1)}, \dots, L_{\sigma(n)}(p)_{\sigma(n)} \in L(p)_{\sigma(n)}} \left\{ f \left( \frac{\bigoplus_{i=1}^n \omega_i (1 + T(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)})) L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)}}{\sum_{i=1}^n \omega_i (1 + T(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)}))} \right)^{-1} \right\}. \quad (5)$$

其中:  $T(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)}) = \sum_{i=1, j \neq i}^n \text{Sup}(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)}, L_{\sigma(j)}(p)_{\sigma(j)})$ ,  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$  为  $L(p)_{\sigma(i)} (i=1, 2, \dots, n)$  的权重向量, 函数  $f(\cdot)$  与后文定义 10 描述的一致.

当  $\omega = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n})^T$  时, PLGOWPA 算子退化为 PLGWPA 算子, 当  $\omega = (\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n})^T$  时, PLGOWPA 算子退化为概率语言术语集广义有序幂平均 (PLGOWPA) 算子.

**性质 1** 1) 可交换性. 设  $(L(p)'_1, L(p)'_2, \dots, L(p)'_n)$  为  $(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n)$  的任意一个排序, 可得到

$$PLGOWPA(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = PLGOWPA(L(p)'_1, L(p)'_2, \dots, L(p)'_n). \quad (6)$$

2) 有界性. 设  $L^-(p) = \{s_{-\tau}(1)\}$ ,  $L^+(p) = \{s_{\tau}(1)\}$ , 其中  $L^-(p)$  和  $L^+(p)$  分别为 PLTS 中的最小值和最大值, 可得到

$$L^-(p) \leq PLGOWPA(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) \leq L^+(p). \quad (7)$$

3) 幂等性. 设  $L(p)_1 = L(p)_2 = \dots = L(p)_n = \{L_1(p)_1, L_2(p)_2, \dots, L_n(p)_n\}$ , 可得到

$$PLGOWPA(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = L(p)_1. \quad (8)$$

由于 PLGWPA 算子与 PLGOWPA 算子性质相同且证明一致, 证明过程略. 针对决策中权重未知且赋权主观性强的问题, 本文基于 PLGOWPA 算子提出一种新 PA 算子进行处理.

**定义 7**  $L(p)_i = \{L_i^{(k)}(p_i^{(k)}) | L_i^{(k)} \in S, p_i^{(k)} \geq 0, k=1, 2, \dots, \#L(p), i=1, 2, \dots, n, \sum_{k=1}^{\#L(p)} p_i^{(k)} \leq 1\}$  为一组 PLTS 信息, 则称

$$PLGPOWA(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = \bigcup_{L_{\sigma(1)}(p)_{\sigma(1)} \in L(p)_{\sigma(1)}, \dots, L_{\sigma(n)}(p)_{\sigma(n)} \in L(p)_{\sigma(n)}} \left\{ f \left( \frac{\bigoplus_{i=1}^n \left[ g \left( \frac{B_i}{TV} \right) - g \left( \frac{B_{i-1}}{TV} \right) \right] L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)}}{\sum_{i=1}^n \left[ g \left( \frac{B_i}{TV} \right) - g \left( \frac{B_{i-1}}{TV} \right) \right]} \right)^{-1} \right\} \quad (9)$$

为概率语言术语集广义幂有序加权平均 (PLGPOWA) 算子, 其中  $(L(p)_{\sigma(1)}, L(p)_{\sigma(2)}, \dots, L(p)_{\sigma(n)})$  为  $(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n)$  的一个有序排列且  $L(p)_{\sigma(n)} \leq L(p)_{\sigma(n-1)} \leq \dots \leq L(p)_{\sigma(2)} \leq L(p)_{\sigma(1)}$ ,  $V_{\sigma(i)} = 1 + T(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)})$ ,  $V_{\sigma(i)} = 1 + T(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)})$ ,  $T(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)}) =$

$$\sum_{j=1, i \neq j}^n \text{Sup}(T(L_{\sigma(i)}(p)_{\sigma(i)}), T(L_{\sigma(j)}(p)_{\sigma(j)})),$$

$$TV = \sum_{i=1}^n V_{\sigma(i)}, B_i = \sum_{j=1}^i V_{\sigma(j)}, f(\cdot)^{-1} \text{为 } f(\cdot) \text{ 的反}$$

函数, 函数  $g(x)$  满足以下两个条件:

- 1)  $g(0) = 0, g(1) = 1$ ;
- 2)  $\forall x, y \in [0, 1]$ , 若  $x > y$ , 则  $g(x) > g(y)$ .

**性质 2** 1) 可交换性. 设  $(L(p)'_1, L(p)'_2, \dots, L(p)'_n)$  为  $(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n)$  的任意一个排序, 可得到

$$\text{PLGPOWA}(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = \text{PLGPOWA}(L(p)'_1, L(p)'_2, \dots, L(p)'_n). \quad (10)$$

2) 有界性. 设  $L^-(p) = \{s_{-\tau}(1)\}, L^+(p) = \{s_{\tau}(1)\}$ , 其中  $L^-(p)$  和  $L^+(p)$  分别为 PLTS 中的最小值和最大值, 可得到

$$L^-(p) \leq \text{PLGPOWA}(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) \leq L^+(p). \quad (11)$$

3) 幂等性. 设  $L(p)_1 = L(p)_2 = \dots = L(p)_n = \{L_1(p)_1, L_2(p)_2, \dots, L_n(p)_n\}$ , 可得到

$$\text{PLGPOWA}(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = L(p)_1. \quad (12)$$

**定理 1** 设  $g(x) = x$ , 可得到

$$\text{PLGPOWA}(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n) = \text{PLGPA}(L(p)_1, L(p)_2, \dots, L(p)_n). \quad (13)$$

### 3 基于概率语言术语集广义幂平均算子的服务型制造设备维护选择方法

基于 PLGPA 算子的服务型制造供应链设备维护选择方法可描述如下: 假设需要有  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$  个设备维护策略的方案, 评价指标  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ , 指标权重  $w_j = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}^T$ , 指标权重满足条件:  $w_j$  在  $0 \sim 1$  间取值, 权重的和为 1. 为体现各设备维护策略方案侧重点不同和优势, 同时赋予专家有序权重  $\lambda_j = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_t\}$ , 专家  $E_k = \{E_1, E_2, \dots, E_t\}$  对候选方案  $x_i$  在指标  $C_j$  的 PLTS 评价信息为  $L(p)_{ij}^{(k)}$ , 则专家  $E_k$  给出的 PLTS 评价信息矩阵为  $H^{(k)} = [L(p)_{ij}^{(k)}]_{m \times n}$ .

step 1: 构造标准化的 PLTS 评价信息  $(H^{(k)})^N = [L(p)_{ij}^{(k)}]_{m \times n}^N$ .

step 2: 采用 PLGWPA 算子对信息进行集结, 则专家  $E_k$  对候选方案  $x_i$  的综合评价信息  $x_i^{(k)}$  为

$$x_i^{(k)} = \text{PLGWPA}(L(p)_{1i}^{(k)}, L(p)_{2i}^{(k)}, \dots, L(p)_{ni}^{(k)}), \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, t. \quad (14)$$

step 3: 采用 PLGOWPA 算子计算候选方案  $x_i$

的群体综合评价信息  $A_i$  为

$$A_i = \text{PLGOWPA}(x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(t)}), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

step 4: 对候选方案进行排序.

**注 4** 当 step 1 和 step 2 里面的指标权重未知时, 采用 PLGPOWA 算子进行计算.

### 4 算例分析

1) 算例.

某制造型企业近年来发展服务型制造, 强调综合解决方案、定制服务、技术支持、数据分析等优势, 满足客户需求并创造价值. 在服务型制造供应链设备运维阶段, 该企业需要从 4 种运维策略中进行选择, 分别为  $x_1$  (自适应维护 + 远程监测)、 $x_2$  (预防性维护 + 定期维护)、 $x_3$  (定期维护 + 紧急维修)、 $x_4$  (预测性维护 + 数据驱动分析). 现有 3 位专家  $E_1$  (维护经理)、 $E_2$  (管理部经理)、 $E_3$  (安全主管) 对各运维策略方案的 3 个指标采用 PLTS 进行评估. 3 个指标分别为成本  $C_1$ 、效率  $C_2$ 、可靠性  $C_3$ . 3 个指标的权重向量设定为  $w = (0.4, 0.2, 0.4)^T$ , 评价采用 7 粒度的 LTS: 非常差 ( $s_{-3}$ )、很差 ( $s_{-2}$ )、差 ( $s_{-1}$ )、一般 ( $s_0$ )、好 ( $s_1$ )、很好 ( $s_2$ )、非常好 ( $s_3$ ). 3 位专家针对 3 个指标的 PLTS 评价信息如表 1 所示.

表1 3位专家的指标评价信息

专家 $E_1$ 的 PLTS 评价信息			
	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$x_1$	$\{s_0(0.2), s_1(0.8)\}$	$\{s_1(0.6), s_2(0.4)\}$	$\{s_{-1}(0.7), s_0(0.3)\}$
$x_2$	$\{s_1(0.3), s_2(0.7)\}$	$\{s_{-1}(0.2), s_0(0.8)\}$	$\{s_1(0.2), s_2(0.4), s_3(0.4)\}$
$x_3$	$\{s_1(0.8), s_2(0.2)\}$	$\{s_1(0.5), s_2(0.5)\}$	$\{s_2(0.6), s_3(0.4)\}$
$x_4$	$\{s_2(0.5), s_3(0.5)\}$	$\{s_0(0.4), s_1(0.6)\}$	$\{s_1(1)\}$
专家 $E_2$ 的 PLTS 评价信息			
	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$x_1$	$\{s_0(0.5), s_1(0.5)\}$	$\{s_1(0.5), s_2(0.5)\}$	$\{s_{-2}(0.2), s_{-1}(0.4), s_0(0.4)\}$
$x_2$	$\{s_1(0.3), s_2(0.3), s_3(0.4)\}$	$\{s_0(0.9), s_1(0.1)\}$	$\{s_3(1)\}$
$x_3$	$\{s_0(0.3), s_1(0.7)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_3(1)\}$
$x_4$	$\{s_1(0.2), s_2(0.8)\}$	$\{s_1(1)\}$	$\{s_0(0.1), s_1(0.9)\}$
专家 $E_3$ 的 PLTS 评价信息			
	$C_1$	$C_2$	$C_3$
$x_1$	$\{s_0(0.4), s_1(0.6)\}$	$\{s_2(1)\}$	$\{s_{-2}(0.2), s_{-1}(0.5), s_0(0.3)\}$
$x_2$	$\{s_3(1)\}$	$\{s_0(1)\}$	$\{s_2(0.6), s_3(0.4)\}$
$x_3$	$\{s_1(0.9), s_2(0.1)\}$	$\{s_1(0.7), s_2(0.3)\}$	$\{s_1(0.2), s_2(0.8)\}$
$x_4$	$\{s_1(0.3), s_2(0.7)\}$	$\{s_1(0.5), s_2(0.5)\}$	$\{s_1(1)\}$

分两种情况对上述案例进行讨论.

**情况 1** 当其中 3 位专家的权重已知时, 权重向量设为  $\lambda=(0.3, 0.3, 0.4)^T$ , 采用本节第 3 部分的决策步骤对方案排序, 这里函数  $f(x)=x^2$ .

step 1: 首先将表 1 的信息进行标准化, 然后利用 PLGWPA 算子对信息进行集结, 得到专家  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  对 4 个候选方案  $x_1 \sim x_4$  的综合评价值  $x_i^k$ .

step 2: 采用 PLGOWPA 算子的综合评价值进行计算. 得到

$$L(p)_{x_1} = \{s_{-0.8521}(0.0483), s_{-0.438}(0.1826), s_{0.113}(0.4027), s_{0.536}(0.2361), s_{0.903}(0.1303)\}$$

$$L(p)_{x_2} = \{s_{-0.582}(0.0186), s_{-0.125}(0.2176), s_{0.343}(0.0865), s_{0.704}(0.2114), s_{1.239}(0.4659)\}$$

$$L(p)_{x_3} = \{s_{0.246}(0.0346), s_{0.792}(0.5274), s_{0.123}(0.3007), s_{0.164}(0.1373)\}$$

$$L(p)_{x_4} = \{s_{0.208}(0.0323), s_{0.592}(0.6088), s_{0.976}(0.2602), s_{0.135}(0.0987)\}.$$

step 3: 计算得分函数并进行比较, 有

$$E(L(p))_{x_1} = 0.1686, E(L(p))_{x_2} = 0.7177,$$

$$E(L(p))_{x_3} = 0.4857, E(L(p))_{x_4} = 0.6342.$$

可得到排序结果为  $x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$ , 因此,  $x_2$  为

最优方案.

在上面的排序过程中, 取  $f(x)=x^2$ , 而不同函数  $f(x)$ , 也会取得不同的结果, 表 2 为不同函数的排序结果. 由表 2 可见, 当函数  $f(x)$  发生改变时, 维护策略的排列顺序发生了改变, 但是最优方案均为  $x_2$ . 当  $f(x)=x$  时, 排列顺序没发生改变, 但是当  $f(x)=x^{1/4}+x^{1/8}$  时,  $x_3$  和  $x_4$  的顺序发生了改变. 因此, 如何选择合适的函数  $f(x)$  在信息的集结过程中也非常重要. 为了计算相对简便, 采用简单的初等函数  $f(x)=x^n$  和  $f(x)=n^x$  进行讨论, 结果如表 3 所示.

表2 不同函数的排列顺序表

函数	排列顺序
$f(x) = x^4 + x^3 + x^2 + x$	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
$f(x) = x^{12} + x^8$	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
$f(x) = x^8 + x^4$	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
$f(x) = x^2 + x$	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
$f(x) = x$	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
$f(x) = \sqrt{x}$	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
$f(x) = x + \sqrt{x}$	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
$f(x) = x^{1/4} + x^{1/8}$	$x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$
$f(x) = x^{1/16} + x^{1/32}$	$x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$
$f(x) = x^{1/64} + x^{1/80}$	$x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$

表3 当  $f(x) = x^n$  时得分值

	函数 $f(x) = x^n$													
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_1$	0.062	0.068	0.073	0.08	0.086	0.169	0.253	0.307	0.338	0.363	0.394	0.422	0.443	0.465
$x_2$	0.33	0.369	0.386	0.443	0.523	0.718	0.928	1.131	1.156	1.185	1.205	1.223	1.231	1.239
$x_3$	0.215	0.242	0.268	0.282	0.324	0.486	0.693	0.832	0.861	0.879	0.896	1.01	1.019	1.023
$x_4$	0.232	0.267	0.312	0.351	0.463	0.634	0.735	0.913	0.962	0.984	1.012	1.025	1.031	1.035

	函数 $f(x) = n^x$													
	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_1$	0.015	0.022	0.028	0.033	0.035	0.076	0.098	1.005	1.007	1.01	1.013	1.014	1.017	1.019
$x_2$	0.55	0.762	0.973	1.18	1.128	2.14	2.92	2.98	2.306	2.311	2.314	2.317	2.321	2.324
$x_3$	0.338	0.372	0.432	0.549	0.652	1.376	1.78	1.824	1.84	1.849	1.855	1.859	1.862	1.865
$x_4$	0.355	0.403	0.472	0.582	0.694	1.465	1.817	1.84	1.857	1.865	1.872	1.876	1.879	1.882

本文探讨了函数  $f(x)=x^n$  和  $f(x)=n^x$  在设备维护策略决策中的应用, 不同的  $n$  值体现了决策者在风险管理和收益追求上的多样化态度. 函数  $f(x)=x^n$  通过调整  $n$  值来放大高指标或低指标的权重: 较大的  $n$  值适用于设备运行稳定、可靠性较高时, 聚焦高效益目标, 如提高可用性和降低故障率; 较小的  $n$  值则适用于设备初期或环境不确定性较高的情境, 更多关注成本控制和风险规避. 函数  $f(x)=n^x$  反映了边际收益的特性, 初期阶段较小的  $n$  值有助于实现显著的边际收益, 稳步提升设备性能; 中后期

阶段较大的  $n$  值则引导高效益目标的维护策略优化. 通过灵活调整  $n$  值, 维护策略可根据设备运行阶段以及具体情境适配不同的经济性和风险控制需求, 从而提升设备的稳定性和生产效率, 最终实现维护成本控制和设备价值最大化.

**情况 2** 在多属性决策的过程中, 权重未知的情况时有发生, 下面将利用所提出 PLGPOWA 算子介绍, 当专家权重未知时, 如何在此类情况下进行决策.

step 1: 与上面情形一致.

step 2: 采用 PLPOWA 算子计算 4 个候选方案

的综合评估值, 分别令 $g(x)=x^2$ 和 $g(x)=\sqrt{x}$ .

当 $f(x)=x, g(x)=x^2$ 时, 得到的综合评价值为

$$L(p)_{x_1} = \{s_{-1.3241}(0.0476), s_{-0.833}(0.1824), \\ s_{-0.125}(0.4122), s_{0.453}(0.2224), \\ s_{0.903}(0.1354)\}.$$

$$L(p)_{x_2} = \{s_{-1.027}(0.0172), s_{-0.431}(0.2203), \\ s_{0.276}(0.0658), s_{0.662}(0.2051), \\ s_{1.146}(0.4916)\}.$$

$$L(p)_{x_3} = \{s_{0.008}(0.0242), s_{0.6234}(0.5274), \\ s_{0.1123}(0.3026), \\ s_{0.154}(0.1458)\}.$$

$$L(p)_{x_4} = \{s_{0.002}(0.0206), s_{0.246}(0.5746), \\ s_{0.427}(0.208), s_{0.621}(0.1968)\}.$$

当 $f(x)=x, g(x)=\sqrt{x}$ 时, 得到的综合评价值为

$$L(p)_{x_1} = \{s_{-0.8187}(0.1046), s_{0.0215}(0.2196), \\ s_{0.5891}(0.3753), s_{1.057}(0.2066), \\ s_{1.642}(0.9039)\}.$$

$$L(p)_{x_2} = \{s_{-0.484}(0.0162), s_{0.273}(0.234), \\ s_{0.808}(0.085), s_{1.531}(0.381), \\ s_{1.821}(0.2838)\}.$$

$$L(p)_{x_3} = \{s_{0.402}(0.1369), s_{0.8827}(0.3381), \\ s_{1.4671}(0.2871), s_{1.785}(0.2379)\}.$$

$$L(p)_{x_4} = \{s_{0.4692}(0.1007), s_{0.757}(0.5746), \\ s_{1.378}(0.208), s_{1.773}(0.1968)\}.$$

当 $f(x)=x, g(x)=x^2$ 时, 通过计算得到的排序结果为 $x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$ .

当 $f(x)=x, g(x)=\sqrt{x}$ 时, 通过计算得到的排序结果为 $x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$ .

可以发现 $x_3$ 和 $x_4$ 的位置发生了改变. 因此, 决策者可根据自身的偏好选择不同的函数从而构建决策

模型, 下面对 $g(x)=x^n$ 取不同值进行讨论, 结果如表4所示.

通过表4可以发现, 不同函数形式和参数选择反映了决策者的心理偏好并影响决策结果. 函数 $f(x)=x, g(x)=x^n$ , 当 $n$ 较大时适用于运行稳定、追求高效益的情境; 当 $n$ 较小时更关注成本控制和风险规避, 适用于设备初期或高不确定性环境. 函数 $f(x)=x^n, g(x)=x$ , 初期阶段小 $n$ 值有助于低投入高收益, 适合建立基础维护体系; 中后期大 $n$ 值强化维护策略, 实现效益最大化. 乐观决策者偏向大 $n$ 值, 追求高效能; 悲观决策者偏向小 $n$ 值, 降低风险并稳步提升性能.

本文采用 PLGOWPA 和 PLGPOWA 算子分别处理已知和未知权重的评价信息. PLGOWPA 适用于已知权重情境, 体现指标重要性并契合企业目标; PLGPOWA 通过动态权重分配减少主观偏见, 提高决策客观性和灵活性. 此方法能够适应不同背景, 增强维护策略选择的科学性和适应性.

#### 5) 算子对比分析.

在上述案例中, 体现了所提出方法的可行性和有效性. 本节为了进一步表明所提出方法的优越性, 将所提出方法与如下4种方法进行比较: 方法1: 选取文献[13]提出的基于概率语言加权算术平均算子的多属性决策方法; 方法2: 文献[14]提出的基于概率语言广义有序加权平均算子的多属性决策方法; 方法3: 文献[15]提出的基于概率语言加权幂广义 Heronian 均值算子的多属性决策方法; 方法4: 文献[12]提出的基于 PLWPA 算子的多属性决策方法. 比较结果如表5所示.

与方法1和方法4相比, 二者排序相同, 但是无法体现方案的侧重点和优势. 所提出 PLGOWPA 算子通过全序关系和有序位置权重, 充分体现方案特点, 使得 $x_4$ 优于 $x_3$ .

表4 当 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别取 $x$ 和 $x^n$ 时得分值

		$f(x)=x, g(x)=x^n$													
		0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_1$		0.187	0.182	0.175	0.172	0.169	0.147	0.123	0.128	0.133	0.138	0.142	0.145	0.147	0.148
$x_2$		0.879	0.83	0.762	0.735	0.717	0.683	0.672	0.662	0.658	0.655	0.653	0.651	0.649	0.648
$x_3$		0.627	0.618	0.611	0.603	0.598	0.587	0.583	0.580	0.579	0.578	0.577	0.576	0.576	0.576
$x_4$		0.682	0.661	0.645	0.632	0.612	0.592	0.582	0.576	0.571	0.568	0.565	0.562	0.56	0.559
		$f(x)=x^n, g(x)=x$													
		0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_1$		0.126	0.133	0.147	0.153	0.158	0.16	0.163	0.165	0.168	0.171	0.174	0.178	0.181	0.203
$x_2$		0.587	0.592	0.618	0.635	0.65	0.65	0.652	0.655	0.659	0.664	0.669	0.676	0.682	0.736
$x_3$		0.562	0.569	0.577	0.583	0.598	0.598	0.6	0.602	0.604	0.607	0.61	0.615	0.619	0.631
$x_4$		0.576	0.583	0.59	0.595	0.608	0.608	0.609	0.611	0.613	0.616	0.619	0.622	0.625	0.641

表5 5种方法比较分析

方法	排列顺序
方法1	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
方法2	$x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$
方法3	$x_3 \succ x_2 \succ x_4 \succ x_1$
方法4	$x_2 \succ x_3 \succ x_4 \succ x_1$
本文方法	$x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$

方法2与本文结果一致(最优解为 $x_2$ ),但是处理极端数据时存在缺陷,极端PLTS数据可能会影响结果。

与方法3相比,方法3的最优解为 $x_2$ ,其算子在处理不同指标重要度时灵活性不足。所提出方法通过抑制高权重指标 $C_1$ 和 $C_3$ 的影响,使得排序更精确。

6) 常见多属性的决策方法比较。

为了全面评估所提出PLGOWPA算子在选择设备维护策略的有效性,将所提出方法 $M_0$ 与几种传统的多准则决策方法进行了比较,包括层次分析法<sup>[16]</sup> $M_1$ 、多准则优化与妥协解决方案<sup>[17]</sup> $M_2$ 、基于理想解相似度的排序技术<sup>[18]</sup> $M_3$ 、复杂比例评估<sup>[19]</sup> $M_4$ 、偏好排序组织法<sup>[20]</sup>。每种方法均应用于相同的上述设备维护策略数据,其结果为 $M_0: x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1, M_1: x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1, M_2: x_2 \approx x_4 \succ x_3 \succ x_1, M_3: x_2 \succ x_4 \succ x_1 \succ x_3, M_4: x_4 \succ x_2 \succ x_3 \succ x_1, M_5: x_2 \succ x_4 \succ x_3 \succ x_1$ 。

结果显示 $x_2$ 为最重要策略, $x_1$ 最不重要。这突显了“预防性维护+定期维护”组合的广泛应用,其可有效预防故障并降低成本。

图1为多方法排序结果的高相关性。所提出方法 $M_0$ 与其他方法相关系数均超过0.8,表明了其稳健性和可靠性。热力图表明,PLGOWPA算子在最优与最差策略排序上与其他方法一致,同时在中间策略排序上保持一致性,展现其应对复杂性与稳定性的优越性,进一步验证其在不同决策环境中的潜力。

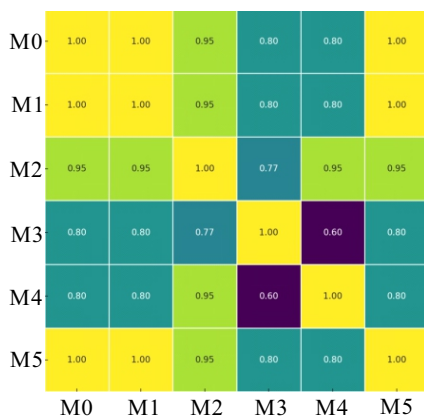


图1 皮尔逊相关系数结果

因此,建议该企业优先采用 $x_2$ 作为主要方案。该策略通过定期检查和预防性维护,有效控制设备故障率和维护成本,适合当前企业追求设备稳定性的需求。同时,可以逐步引入 $x_4$ ,利用数据驱动的预测性维护方式,进一步提升设备的管理精度和效益最大化。 $x_3$ 可作为应急补充策略,综合以上设备维护策略选择,以确保设备维护的科学性和经济性。

5 结论

服务型制造作为制造企业未来发展的重要趋势,为产品延伸至高端价值链提供了重要机会,其中设备维护策略的选择是关键环节之一。本文基于PLGOWPA算子和PLGPOWA算子的分析模型,提出了新的设备维护策略选择解决方案,为企业提供了新的决策思路。

然而,本文也存在一些局限性。由于模型的复杂性,在实际应用中对数据质量和模型参数的准确性要求较高。实证分析中所选的样本范围较为有限,广泛性验证有待扩展,以确保模型在不同应用场景中的适用性。

未来的研究方向: 1) 融合人工智能与大数据,提升设备维护的精准性和效率; 2) 研究设备维护与供应链、产品质量和客户满意度的关系,以提升服务型制造供应链的整体韧性; 3) 扩展方法的实证研究,将其应用于更多制造场景,以验证模型的普适性。

服务型制造在新一轮工业革命浪潮中具有重要意义。通过选择适当的设备维护策略,制造企业可提高生产效率、降低运营成本,并更好地满足客户不断变化的需求。然而,要实现服务型制造的全面转型和升级,仍然需要持续不断地研究和创新,以应对日益复杂和不确定的市场环境,进一步提升中国制造业的核心竞争力,为经济的可持续发展贡献力量。

参考文献 (References)

[1] 杨亮, 刘勤明, 叶春明, 等. 考虑能源效率的设备预防性维护策略[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(4): 1422-1432. (Yang L, Liu Q M, Ye C M, et al. Preventive maintenance strategy of equipment considering energy efficiency[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(4): 1422-1432.)

[2] 戴勇. 考虑供应商和客户风险态度的服务备件供应链的PBC合同设计[J]. 工程管理科技前沿, 2022, 41(2): 49-55. (Dai Y. PBC contract design of service parts supply chain by considering risk attitude of supplier and customer[J]. Frontiers of Science and Technology of Engineering Management, 2022, 41(2): 49-55.)

[3] March S T, Scudder G D. Predictive maintenance:

- Strategic use of IT in manufacturing organizations[J]. *Information Systems Frontiers*, 2019, 21(2): 327-341.
- [4] Chang F T, Zhou G H, Cheng W, et al. A service-oriented multi-player maintenance grouping strategy for complex multi-component system based on game theory[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2019, 42: 100970.
- [5] Jiang Z Z, Feng G Q, Yi Z L, et al. Service-oriented manufacturing: A literature review and future research directions[J]. *Frontiers of Engineering Management*, 2022, 9(1): 71-88.
- [6] 李强, 刘思峰. 两阶段设备维护策略选择的灰靶决策模型[J]. *控制与决策*, 2023, 38(6): 1712-1720.  
(Li Q, Liu S F. Grey target decision model for two-stage equipment maintenance strategy selection[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(6): 1712-1720.)
- [7] Liu P D, Liu X. The neutrosophic number generalized weighted power averaging operator and its application in multiple attribute group decision making[J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2018, 9(2): 347-358.
- [8] Zhao X Y, Zhang X W, Zhang W M, et al. Some induced generalized ordered weighted power average operators within intuitionistic trapezoidal fuzzy setting[C]. *The 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. Changsha, 2016: 923-928.
- [9] Wang H, Xu Z S. Total orders of extended hesitant fuzzy linguistic term sets: Definitions, generations and applications[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 107: 142-154.
- [10] Gou X J, Xu Z S. Novel basic operational laws for linguistic terms, hesitant fuzzy linguistic term sets and probabilistic linguistic term sets[J]. *Information Sciences*, 2016, 372: 407-427.
- [11] 胡英杰, 朱建军. 考虑量子干涉的信任网络群体共识决策方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(12): 4007-4016.  
(Hu Y J, Zhu J J. Group consensus decision-making method for trust networks considering quantum interference[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(12): 4007-4016.)
- [12] 李颖. 基于概率语言术语集的多属性群决策方法研究[D]. 济南: 山东财经大学, 2019.  
(Li Y. The research on multi-attribute group decision making based on probabilistic linguistic term sets[D]. Jinan: Shandong University of Finance and Economics, 2019.)
- [13] Pang Q, Wang H, Xu Z S. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making[J]. *Information Sciences*, 2016, 369: 128-143.
- [14] Xu G L, Wan S P, Li X B, et al. An integrated method for multiattribute group decision making with probabilistic linguistic term sets[J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2021, 36(11): 6871-6912.
- [15] Xiao F, Wang J Q. Multistage decision support framework for sites selection of solar power plants with probabilistic linguistic information[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 230: 1396-1409.
- [16] Sáenz-Royo C, Chiclana F, Herrera-Viedma E. Ordering vs. AHP. Does the intensity used in the decision support techniques compensate?[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 121922.
- [17] Peng J J, Chen X G, Long Q Q, et al. A picture fuzzy evaluation framework based on a novel approach incorporating bidirectional projection measures and the VIKOR method[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(2): 2235-2261.
- [18] 徐泽水, 钱渝, 李铭, 等. 基于语言偏好序的多属性群决策方法及其在废旧物资循环利用中的应用[J]. *控制与决策*, 2024, 39(7): 2363-2374.  
(Xu Z S, Qian Y, Li M, et al. Multi-attribute group decision-making method based on linguistic preference ordering and its application in waste material recycling[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(7): 2363-2374.)
- [19] Kang D, Jaisankar R, Murugesan V, et al. A novel MCDM approach to selecting a biodegradable dynamic plastic product: A probabilistic hesitant fuzzy set-based COPRAS method[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 340: 117967.
- [20] 廖虎昌, 杨竹, 徐泽水, 等. 犹豫模糊语言 PROMETHEE 方法在川酒品牌评价中的应用[J]. *控制与决策*, 2019, 34(12): 2727-2736.  
(Liao H C, Yang Z, Xu Z S, et al. A hesitant fuzzy linguistic PROMETHEE method and its application in Sichuan liquor brand evaluation[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(12): 2727-2736.)

### 作者简介

张永政 (1990-), 男, 博士生, 主要研究方向为多属性决策、服务设计, E-mail: [yongzheng56@163.com](mailto:yongzheng56@163.com);

叶春明 (1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为多属性决策、调度, E-mail: [yechm6464@163.com](mailto:yechm6464@163.com);

耿秀丽 (1984-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为多属性决策、服务设计, E-mail: [xiuliforever@163.com](mailto:xiuliforever@163.com).