

模糊拟和算子在检测自吸泵性能状态中的应用

赵 辉¹, 单云霄¹, 张 元², 姜欣格¹

(1. 哈尔滨理工大学 理学院, 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了对自吸泵在不同情况下的性能状态进行精准检测评估, 更好地权衡自吸泵工作性能参数对水泵系统整体性能状态的影响。以一台 80-70Z 型号自吸水泵为研究对象, 提出了一种新的 Sugeno - 模糊拟和算子及模糊积分, 并将其应用于模糊概率运算的新方法。首先利用该方法得出单体水泵性能状态的模糊概率值; 其次运用模糊综合评价法对各水泵的性能状态所属评价集进行有效评估; 最后将所得的模糊概率值与综合评判结果进行比对, 实验结果十分一致。从而验证了该方法的可靠性, 并克服了模糊综合评判法在实际应用中的局限性和模糊性。

关键词: 自吸泵; Sugeno - 模糊拟和算子; 模糊概率; 性能状态; 综合评判

DOI: 10.15938/j.jhust.2021.01.024

中图分类号: TH122 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2021)01-0164-07

Application of Fuzzy Quasi-sum Operator in Detecting Performance Status of Self-priming Pump

ZHAO Hui¹, SHAN Yun-xiao¹, ZHANG Yuan², JIANG Xin-ge¹

(1. School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the performance state of the self-priming pump under different conditions, and better balance the influence of self-priming pump performance parameters on the performance status of the overall pump system, this article takes a 80-70Z model self-priming pump as the research object and a new Sugeno fuzzy quasi-sum operator and fuzzy integral are proposed and applied to the new method of fuzzy probability operation. Firstly, the fuzzy probability value of the performance state of the single water pump is obtained by using this method. Then, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to effectively evaluate the evaluation set of the performance status of each pump. Finally, the obtained fuzzy probability values are compared with the comprehensive evaluation results, and the experimental results are very consistent, thereby verifying the reliability of the method, and overcomes the limitations and ambiguities of the fuzzy comprehensive evaluation method in practical applications.

Keywords: self-priming pump; Sugeno fuzzy fit operator; fuzzy probability; performance state; comprehensive evaluation

收稿日期: 2018-10-31

基金项目: 四川省科技计划项目(2016JZ0014-I); 黑龙江省自然科学基金(A201214)。

作者简介: 赵 辉(1963—), 男, 教授, 硕士研究生导师;

张 元(1966—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师。

通信作者: 单云霄(1995—), 女, 硕士研究生, E-mail: 1428015454@qq.com。

0 引言

自吸泵在我国起步较晚,20世纪60年代才出现,到80年代有了较大的发展^[1],目前在性能、设计能力和技术创新方面较国际水平尚存在很大差距^[2]。自吸泵广泛应用于煤矿、化工、船舶等^[3]领域,相比于传统的普通离心泵能够实现自动化操作,便于远程集中控制自吸泵^[4],并能针对不同情况较精准地控制其工作性能参数,从而极大地提高其工作效率。因此自吸泵性能状态的好坏将直接影响水泵乃至机械领域的多样化发展及后续的研究,有效地评价水泵工作能力状态,从而充分发挥出水泵最大效能,为后续水泵的维护与检修提供合理有力的参考意见,以此来保障水泵的使用性能和杜绝安全隐患^[5],同时对于正确选择和开发新产品等都具有重要的科研和实用意义。

使用新的智能算法提取特征量^[6],对水泵性能状态进一步分析判断,依然是当前研究领域的重点和难点。李卫周、崔彦平、彭中军^[7-9]利用美国虚拟仪器开发平台所得的水泵性能参数成功组建了一套完整的水泵性能多功能检测与处理系统,分析水泵的性能特点、描绘了其性能曲线,并对水泵的性能效果进行评价分析;2016年董建新、侯全放^[10]分析并研究了锅炉给水泵的性能参数及其计算方法,并且建立了汽动给水泵组的性能指标评价模型;2018年马希金、张亚琼等^[11]通过计算流体力学的分析方法对自吸泵内部流动进行数值模拟,对其回流孔两侧压差、回流孔回流量及自吸泵性能进行分析研究;同年魏清顺等^[12]以250QJ125-46/1型号的潜水泵导流器为研究对象,结合理论分析、计算机仿真与试验研究,构建出不同结构参数导流器模型,同时对导流器参数耦合作用下,潜水泵性能的变化规律进行分析研究。

自吸泵性能研究是一种全新的领域,目前对该领域的研究尚不完备,上述方法均局限性较强,很难灵活可靠地应用在相关领域中。因此为了对自吸泵系统的性能状态进行更准确地分析掌控,提出了一种新的 Sugeno-模糊拟和算子及模糊积分,并将其应用于模糊概率运算的新方法。该方法不仅可以大大缩减计算量,而且还可以克服模糊综合评判法^[13-15]在实际应用中评价因素权重取值的局限性和模糊性,得到自吸泵性能状态的综合判别结果,对水泵性能状态的评价及后续研究更具使用价值和科学性,同时也可将此方法灵活应用在不同技术领域。

1 基于 Sugeno-模糊拟和算子及其积分对自吸泵性能状态的检测原理

模糊概率的基本理论^[16-17]是模糊和随机2个不同的概念,但由于它们都具有不确定性,彼此之间又有联系,从而产生了 Fuzzy 概率。为了克服了模糊概率及综合评判法在实际应用中评价因素权重取值的局限性和模糊性,更贴近指标因素运算特性,设计了一种 Sugeno-模糊拟和算子及积分,将其应用到模糊概率的计算中,具体形式如下:

1.1 Sugeno-模糊拟和算子的构造原理

算子 ε^* 为 $[0,1]$ 上的 S -模,构造的该拟和算子须满足 S -模中的4个基本条件:

- 1) 交换律: $S(a, b) = S(b, a)$
- 2) 结合律: $S(S(a, b), c) = S(a, S(b, c))$
- 3) 单调性: 如果有 $a_1 \leq a_2, b_1 \leq b_2$, 则有 $S(a_1, b_1) \leq S(a_2, b_2)$
- 4) 边界条件: $S(a, 0) = a$

1.2 Sugeno-模糊拟和算子的设计

设映射 $S: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1], \forall a, b, c, d \in [0,1], \gamma \in (-\infty, 0]$, 构造 γ -拟和算子:

$$a \varepsilon^* b = \frac{a + b - \gamma ab}{1 + ab}$$

证明设计的拟和算子满足 S -模中的4个基本条件:

- 1) $\forall a, b \in [0,1]$, 有

$$a \varepsilon^* b = \frac{a + b - \gamma ab}{1 + ab} = \frac{b + a - \gamma ba}{1 + ba} = b \varepsilon^* a$$

即 $a \varepsilon^* b = b \varepsilon^* a$

$$2) (a \varepsilon^* b) \varepsilon^* c = \frac{a \varepsilon^* b + c - \gamma(a \varepsilon^* b) c}{1 + (a \varepsilon^* b) c} =$$

$$\frac{a + b + c - \gamma ab - \gamma ac - \gamma bc + (1 + \gamma^2) abc}{1 + ab + ac + bc - \gamma abc} =$$

$$a \varepsilon^* (b \varepsilon^* c), \text{ 即 } (a \varepsilon^* b) \varepsilon^* c = a \varepsilon^* (b \varepsilon^* c)$$

- 3) $\forall a, b, c, d \in [0,1], a \leq c, b \leq d, \gamma \in (-\infty, 0]$, 且 $ab \leq cd \Rightarrow$

$$\frac{a + b - \gamma ab}{1 + ab} - \frac{c + d - \gamma cd}{1 + cd} =$$

$$\frac{(a + b - \gamma ab)(1 + cd) - (c + d - \gamma cd)(1 + ab)}{(1 + ab)(1 + cd)} =$$

$$\frac{(a - c)(1 - bd) + (b - d)(1 - ac) + \gamma(cd - ab)}{(1 + ab)(1 + cd)} \leq 0$$

$$\text{故有 } \frac{a + b - \gamma ab}{1 + ab} \leq \frac{c + d - \gamma cd}{1 + cd}, \text{ 即 } a \varepsilon^* b$$

$$\leq c \varepsilon^* d$$

$$4) \forall a \in [0,1], a \dot{\varepsilon} 0 = \frac{a+0-\gamma^*0}{1+0} = a$$

故 $\dot{\varepsilon}^+$ 满足 S -模条件,即构造的 γ -拟和算子 $a \dot{\varepsilon}^+ b = \frac{a+b-\gamma ab}{1+ab}$ 成立。

注:在实际应用中, γ 可根据数据特点并以计算简便为前提,在所属范围内确定适值。本文后续应用中为了方便计算,达到计算量最小的效果,这里取 $\gamma=0$ 即可。

1.3 模糊概率空间下的 Sugeno 拟和概率积分

给定模糊概率空间 $(X, \mathcal{F}, \mu)$, $f: X \rightarrow [0,1]$ 是可测函数, $f \in \mathcal{F}$, 其中 μ 是概率测度, 且 $A \in \mathcal{F}$, $\dot{\varepsilon}^+$ 为拟和算子, 则有:

$$\int_A f d\mu = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha \dot{\varepsilon}^+ \mu(A \cap N_\alpha(f))]$$

称 $\int_A f d\mu$ 为 f 在 A 上关于 μ 的 Sugeno 拟和概率积分。其中:

$$N_\alpha(f) = \{x \mid f(x) \geq \alpha, x \in X\} (\alpha \in [0,1])$$

当 $\int_A f d\mu \leq 1$ 时, 称 f 在 A 上可积, 记“sup”为上确

界, $L_+^1(X)$ 为 X 上全体非负可积函数构成的集合。

然后基于最大概率原则, 将各项指标统一量化, 根据不同指标对评判对象的影响程度分配权重, 从而求出各因素的模糊概率^[18-19], 对各评价对象作出合理的综合排序, 最后基于模糊概率并利用综合评价对自吸泵的性能状态作出有效的评估。

2 对自吸泵性能状态检测评估的具体实施步骤

2.1 因素集和评语集确定

由于影响水泵性能状态的评价因素较多, 经多方数据调查及相关文献的查阅, 水泵性能状态的判定主要由水泵流量、扬程、转速、配套功率、效率、自吸时间 6 个方面的综合指标因素决定。

1) 因素集:

$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} = \{\text{流量、扬程、转速、配套功率、效率、自吸时间}\};$

2) 评语集:

$V = \{v_1, v_2, v_3\} = \{\text{优、良、差}\}。$

2.2 数据的选取

以国内湘潭水泵厂 80-70Z 型号自吸泵为研究对象, 由于同一型号的水泵在生产过程中会存在或多或少的误差, 导致其实际水泵参数并没有达到标准值^[20], 即在标准值上下浮动。因此为了检验该型号水泵性能状态的好坏, 从中随机选取 8 个水泵作为研究主体, 以保证实验的可靠性。根据水泵在吸程 5、6、8、8.5 m 几个不同吸程下所做实验得到的各影响因素数据情况来判别该型号水泵的性能状态。

首先对吸程 5 m 时自吸泵的性能状态情况进行评判, 自吸泵各性能指标数据由所在工科机械实验室团队反复多次试验得到, 具体见下表 1:

表 1 自吸泵性能指标因素数据

Tab. 1 Data of performance Index factors of self-priming pump

评判对象	流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	扬程 /m	转速 /($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	配套功率 /hp	效率 /%	自吸时间 /s
水泵 1	49.963 1	70.012	2 900.154	19.961	70.196	58.124
水泵 2	50.011	70.005	2 900.012	20.008	70.201	58.01
水泵 3	49.953 3	70.025	2 899.987	19.975	70.128	58.098
水泵 4	50.034 4	69.973	2 900.116	20.032	70.216	57.967
水泵 5	49.915 7	69.981	2 899.963	20.014	70.234	57.875
水泵 6	50.002 5	70.022	2 899.971	19.987	70.185	58.109
水泵 7	50.013 2	69.964	2 899.953	19.958	70.197	57.852
水泵 8	49.968 7	69.997	2 900.108	20.024	70.209	57.963

2.3 计算水泵性能状态指标的隶属度

在水泵性能状态综合评价中, 评价指标的量值

等级通常具有模糊性, 对于第 i 个水泵的第 j 个水泵性能指标集合, 每一个水泵性能指标量值对于集合

中最大值 $\max(X_{ij})$ 的隶属度 $\mu(X_{ij})$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$) 是不同的, $\mu(X_{ij})$ 用式(1) 计算:

$$\mu(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{ij_{\min}}}{X_{ij_{\max}} - X_{ij_{\min}}} \quad (1)$$

($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8; j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

X_{ij} 表示第 i 个水泵第 j 个水泵性能指标值, $X_{ij_{\max}}$ 表示第 i 个水泵的第 j 个水泵性能指标集合中的最大值, $X_{ij_{\min}}$ 表示第 i 个水泵的第 j 个水泵性能指标集合中的最小值, $\mu(X_{ij})$ 表示第 i 个水泵的第 j 个水泵性能指标值对于 $X_{ij_{\max}}$ 的隶属度。

以水泵流量指标为例,从表 1 可知 8 个水泵的水泵流量值依次为 49.963 1、50、49.953 3、50.034 4、49.915 7、50、50.013 2、49.968 7(m^3/h)。其中 $X_{ij_{\max}} = 50.034 4, X_{ij_{\min}} = 49.915 7$ 。由此可计算出水泵 1 中第一个指标因素流量的隶属度为

$$\mu(X_{11}) = \frac{49.963 1 - 49.915 7}{50.034 4 - 49.915 7} = 0.399 3$$

同理依照此方法可计算出 8 个水泵其它水泵性能指标的所属隶属度,在此不过多赘述,具体计算结果见下表 2:

表 2 自吸泵性能指标的隶属度
Tab. 2 Membership degree of performance index of self-priming pump

评判对象	流量	扬程	转速	配套功率	效率	自吸时间
水泵 1	0.399 3	0.786 9	1	0.040 5	0.641 5	1
水泵 2	0.802 9	0.672 1	0.293 5	0.675 7	0.688 7	0.580 9
水泵 3	0.316 8	1	0.169 2	0.229 7	0	0.904 4
水泵 4	1	0.147 5	0.810 9	1	0.830 2	0.422 8
水泵 5	0	0.278 7	0.049 8	0.756 8	1	0.084 6
水泵 6	0.731 3	0.950 8	0.089 6	0.391 9	0.537 7	0.944 9
水泵 7	0.821 4	0	0	0	0.650 9	0
水泵 8	0.446 5	0.541 0	0.771 1	0.891 9	0.764 2	0.408 1

2.4 确定各水泵性能指标的权重

本文将运用变异系数法计算各水泵性能指标的权重。变异系数法是直接运用各项指标的信息计算出指标的权重;同时,运动变异系数法可以避免各项指标因量纲不同所产生的影响。 V_j 计算如式(2) 所示:

$$V_j = \frac{\sigma_j}{\bar{x}_j} (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

其中: V_j 表示第 j 项水泵性能指标的变异系数; σ_j 表示第 j 项水泵性能指标的标准差; $\bar{x}_j$ 表示第 j 项水泵性能指标的平均数。

计算权重公式如式(3) 所示:

$$W_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (3)$$

计算过程如下:

- 1) 先分别计算每个水泵性能指标的平均值和标准差;
- 2) 再由平均值和标准差来计算变异系数^[2];
- 3) 最后把各水泵性能指标的变异系数求和,从而计算出这 6 个水泵性能指标的权重。

由此可得 6 个性能指标所对应的变异系数和权重,具体数据见下表 3。

表 3 性能指标对应的变异系数及权重
Tab. 3 Coefficient of variation and weight corresponding to performance indicators

	流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	扬程 $/\text{m}$	转速 $/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	配套功率 $/\text{hp}$	效率 $/\%$	自吸时间 $/\text{s}$
平均值	49.982 7	69.997 4	2 900.033	19.994 9	70.195 8	57.999 8
标准差	0.036 6	0.021 3	0.074 9	0.026 8	0.029 1	0.098 1
变异系数	0.000 7	0.000 3	2.582E-05	0.001 3	0.000 4	0.001 7
权重	0.164 0	0.068 0	0.005 8	0.299 6	0.092 9	0.378 5

2.5 计算各自吸泵性能指标的模糊概率值

综上所述,由以上计算结果可判断出各指标因素所对应的概率 $P(A)$ 如下式(4)所示:

$$P(A) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu(x_i) P_i \quad (4)$$

由于影响水泵性能因素之间是有一定联系的,所以为了用更贴切地运算形式表达它们之间的运算关系,针对此方法设计一种模糊概率运算中的 Sugeno-模糊拟和算子,在式(4)基础上进行改进,给出基于拟和算子的模糊概率如下式(5):

$$P(A_i) = \int_A d\mu = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha \varepsilon \mu(A \cap N_{\alpha}(f))] \quad (5)$$

由于本问题的被积函数是离散变量而非连续变量,且根据实际问题分析,此时令 $\alpha = W_j, \mu(A \cap N_{\alpha}(f)) = \mu(x_{ij})$,则可把式(5)改写成式(6):

$$P(A_i) = \sup [W_j \varepsilon \mu(x_{ij})] \quad (6)$$

则可知单体水泵 1、2 性能状态的模糊概率值分别如下所示:

$$\begin{aligned} P(A_1) &= \sup [W_j \varepsilon \mu(x_{1j})] = \\ \sup \left[\frac{W_j + \mu(x_{1j}) - 0 \times W_j \times \mu(x_{1j})}{1 + W_j \times \mu(x_{1j})} \right] &= 0.9942 \\ P(A_2) &= \sup [W_j \varepsilon \mu(x_{2j})] = \\ \sup \left[\frac{W_j + \mu(x_{2j}) - 0 \times W_j \times \mu(x_{2j})}{1 + W_j \times \mu(x_{2j})} \right] &= 0.7380 \end{aligned}$$

其中: $P(A_i)$ 表示各水泵性能状态的模糊概率; W_j 表示各水泵性能指标的所属权重; $\mu(x_{ij})$ 表示第 i 个水泵的第 j 个水泵性能指标值的隶属度。

其余 6 个单体水泵的模糊概率值的计算方法同上,在此不做过多赘述,具体数据见下表 4。

表 4 水泵性能状态的模糊概率

Tab. 4 Fuzzy probability of pump performance status

水泵	$P(A)$	排序
水泵 1	0.994 2	1
水泵 2	0.738 0	8
水泵 3	0.936 3	2
水泵 4	0.859 1	5
水泵 5	0.915 0	3
水泵 6	0.896 2	4
水泵 7	0.749 7	7
水泵 8	0.769 0	6

通过表 4 可以看出 8 个水泵的性能状态由高至低排序为水泵 1、3、5、6、4、8、7、2。

2.6 综合评价

由于自控自吸式水泵作为一个全新的概念被提出,因此在这个新结构领域下可以参照的相关专家研究成果少之又少,但是从另一方面看,该领域的专家对所要调查的问题研究得也最为透彻、最熟悉,因此选择专家经验法给出相应评判矩阵。

专家经验法是根据专家的实际经验给出模糊信息的处理算式或相应权重系数值来确定隶属函数的一种方法^[2]。在许多情况下,经常是初步确定粗略的隶属函数,然后再通过学习和实践检验逐步修改和完善,而实际效果正是检验和调整隶属函数的依据。本次通过机械学院多位专业实验室人员对每一个单体水泵进行 10 次不同吸程下的循环实验,共实验 80 次得到可靠的各单体水泵打分情况,具体数据如下表 5。

表 5 单体水泵 1 实验数据评价情况

Tab. 5 Evaluation of the experimental data of the single water pump 1

评价因素 评价等级	优	良	差
流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	6	3	1
扬程/m	4	4	2
转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	8	0	2
配套功率/hp	7	2	1
效率/%	6	2	2
自吸时间/s	5	3	2

由表 5 中单体水泵各指标因素所对应的的评价等级可知,单体水泵 1 的流量在 10 次循环实验中有 6 次完全达到标准值,故健康状态的隶属度为 $\frac{6}{10} = 0.6$,同理可算出单体水泵 1 其他评价指标因素的所属隶属度。其余 7 个单体水泵的各项指标的隶属度也均可由上述方法得到。从而可知:由表 2 知,单体水泵 1 的流量在 10 次循环实验中为优的隶属度是 $\frac{6}{10} = 0.6$,流量为良的隶属度是 $\frac{3}{10} = 0.3$,流量为差的隶属度是 $\frac{1}{10} = 0.1$ 。扬程为优的隶属度是 $\frac{4}{10} = 0.4$,扬程为良的隶属度是 $\frac{4}{10} = 0.4$,扬程为差的隶属度是 $\frac{2}{10} = 0.2$ 。同理可算出单体水泵 1 其他评价指标因素的所属隶属度,如下所示:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.8 & 0 & 0.2 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \end{pmatrix}$$

同理可计算出其余 7 组单体水泵的各项指标因素数据相应的模糊评判矩阵如下:

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.1 & 0.5 & 0.4 \\ 0.3 & 0.2 & 0.5 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0.3 & 0.1 & 0.6 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 \end{pmatrix}$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0.6 & 0 & 0.4 \end{pmatrix}$$

$$R_5 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.3 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0.9 & 0 & 0.1 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \end{pmatrix}$$

$$R_6 = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0.7 & 0 & 0.3 \end{pmatrix}$$

$$R_7 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$R_8 = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.7 & 0.1 \\ 0.2 & 0.5 & 0.3 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 \\ 0.7 & 0 & 0.3 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 \end{pmatrix}$$

由上述表 3 可知权重集为

$$W = (0.164\ 0 \quad 0.068\ 0 \quad 0.005\ 8 \quad 0.299\ 6 \quad 0.092\ 9 \quad 0.378\ 5)$$

由权重集与模糊评判矩阵复合可得各水泵所属评价集的最终评判结果,如式(7)所示:

$$B = W \circ R \quad (7)$$

则有:

$$B_1 = W \circ R_1 = (0.584\ 9 \quad 0.268\ 4 \quad 0.155\ 4)$$

$$B_2 = W \circ R_2 = (0.278\ 5 \quad 0.259\ 4 \quad 0.470\ 8)$$

$$B_3 = W \circ R_3 = (0.395\ 1 \quad 0.317\ 6 \quad 0.296\ 1)$$

$$B_4 = W \circ R_4 = (0.452\ 6 \quad 0.348\ 8 \quad 0.207\ 4)$$

$$B_5 = W \circ R_5 = (0.449\ 9 \quad 0.422\ 9 \quad 0.135\ 9)$$

$$B_6 = W \circ R_6 = (0.548\ 3 \quad 0.223\ 4 \quad 0.237\ 2)$$

$$B_7 = W \circ R_7 = (0.151\ 2 \quad 0.640\ 2 \quad 0.217\ 4)$$

$$B_8 = W \circ R_8 = (0.258\ 4 \quad 0.549\ 5 \quad 0.200\ 9)$$

为了更清晰直接地观察分析出水泵性能状态的好坏,通过已得数据并运用 matlab 程序可以得到水泵性能状态的最终评价情况,如下图 1 所示。

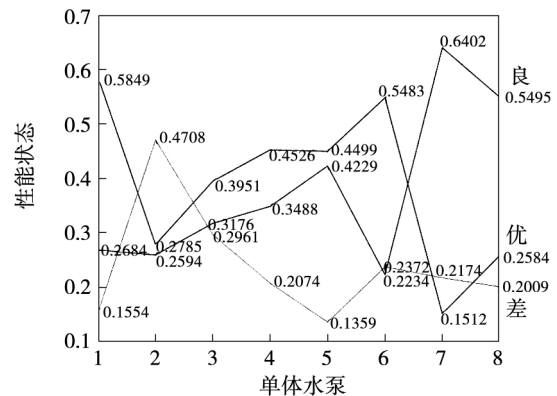


图 1 8 个单体水泵性能状态评价结果图

Fig. 1 Diagram of performance state evaluation of eight single water pumps

由上述计算结果和水泵性能状态评价图,按照最大隶属度原则,可以得出单体水泵 1、3、4、5、6 性能状态的评价处于优; 单体水泵 7、8 性能状态的评价处于良好; 单体水泵 2 性能状态的评价处于差。由此结果验证了基于设计的 Sugeno - 模糊拟和算子及模糊积分所计算出的模糊概率排序结果与综合评

判结果完全一致,证明了该方法的科学合理性及可靠性。综上所述,该型号水泵8组中有7组性能状态均处于优良,说明该型号水泵性能状态总体情况很健康,可以很放心、安全地应用于船舶、农业、电力、矿山等各领域。

3 结论与分析

设计一种 Sugeno - 模糊拟和算子及其积分,将其与模糊概率运算相结合,并采用模糊综合评判的方法对自吸泵的性能状态进行有效评估;并在该方法所得结果的基础上与综合评判结果进行比较验证,从而优化提高了传统方法的可靠性和准确性,同时也克服了模糊综合评判法在实际应用中评价因素权重取值的局限性和模糊性。

Sugeno - 模糊拟和算子及其积分的模糊概率和综合评判模型,不仅适用于解决自吸泵性能状态的评估检测问题,还可以解决有相似特性的其他工科科研模型的评估问题。该方法具有计算结果精确度高、结论清晰明确的优点,而且具有很好的泛化能力。考虑到模糊算子和模糊积分在机械领域尚存在巨大潜力空间,以及其他未知领域的可探索性,所以这将会是未来值得我们继续去更深入的探讨和创新的研究方向。

参考文献:

- [1] 郭晓梅,杨敏官,王春林. 自吸泵现状分析 [J]. 水泵技术, 2002, 1(1): 27.
- GUO Xiaomei, YANG Minguan, WANG Chunlin. Analysis of the Status Quo of Self-priming Pumps [J]. Pump Technology, 2002, 1(1): 27.
- [2] 赵继宝. 国内外水泵技术的研究现状与发展前景 [J]. 黑龙江工业学院学报, 2008, 8(2): 110.
- ZHAO Jibao. Research Status and Development Prospects of Water Pump Technology at Home and Abroad [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2008, 8(2): 110.
- [3] 渠时远. 我国水泵发展现状和节能的技术途径 [J]. 通用机械, 2011, 2(6): 14.
- QU Shiyuan. My Country's Water Pump Development Status and Energy-saving Technical Approaches [J]. General Machinery, 2011, 2(6): 14.
- [4] 宋岩. 基于功能复合的单级卧式自吸水泵研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- SU X, LI Y, YANG C. Performance Prediction and Experimental Study of Serial-Parallel Centrifugal Pumps [C] // International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering. IET, 2015: 1.
- [5] 李震. 煤矿井下水泵性能分析状态监控与故障诊断系统研究与应用 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- LI Zhong. 基于虚拟仪器的水泵性能检测与故障诊断系统 [D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [6] 崔彦平. 水泵状态监测与故障诊断系统 [D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
- [7] 彭中军. 基于虚拟仪器的水泵性能多功能检测与处理系统的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [8] 董建新, 侯全放. 汽动给水泵经济性与变工况特性研究 [J]. 丝路视野, 2016(13): 74.
- DONG Jianxin, HOU Quanfang. Research on the Economy and Off-condition Characteristics of Steam-driven Feed Water Pumps [J]. The Silk Road Vision, 2016(13): 74.
- [9] 马希金, 张亚琼, 崔生磊, 等. 回流孔面积大小对自吸泵性能影响的研究 [J]. 甘肃科学学报, 2018(2): 13.
- MA Xijin, ZHANG Yaqiong, CUI Shenglei, et al. Study on the Effect of the Area of the Return Hole on the Performance of the Self-priming Pump [J]. Journal of Gansu Sciences, 2018(2): 13.
- [10] 魏清顺, 孙西欢. 基于黑箱理论的潜水泵导流器叶片数优化研究 [J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 141.
- WEI Qingshun, SUN Xihuan. Research on Diffuser Blade Number Optimization of Submersible Pump Based on Black Box Theory [J]. Yellow River, 2018, 40(7): 141.
- [11] 赵辉, 刘娜, 周永勤. 模糊综合评判在电池性能检测中的应用 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018(3): 143.
- ZHAO Hui, LIU Na, ZHOU Yongqin. The Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation on the Battery Performance [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018(3): 143.
- [12] ZHANG J, XIAO Q, HUANG D, et al. The Analysis of Fuzzy Inference System and Fuzzy Comprehensive Evaluation and Their Application on Storm Surge Disaster Assessment [C] // International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2009: 592.
- [13] 姜君. 基于熵权与变异系数组合赋权法的模糊综合评价模型 [D]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [14] FARHADINIA B. Information Measures for Hesitant Fuzzy Sets and Interval-Valued Hesitant Fuzzy Sets [J]. Information Sciences, 2013, 240(10): 129.
- [15] SZMIDT E, KACPRZYK J. A Concept of a Probability of an Intuitionistic Fuzzy Event [C] // Fuzzy Systems Conference Proceedings. IEEE, 1999: 1346.
- [16] 孙化军, 马文姬, 闫向前, 等. 模糊概率法综合评价大豆新品种的初步研究 [J]. 大豆科技, 2018(2): 57.
- SUN Huajun, MA Wenyi, YAN Xiangqian, et al. Preliminary Study on Comprehensive Evaluation of New Soybean Varieties by Fuzzy Probability Method [J]. Soybean Science & Technology, 2018(2): 57.
- [17] 王国印. 模糊概率在棉花品种综合评价中的应用初探 [J]. 作物学报, 1992(6): 458.
- WANG Guoyin. Preliminary Study on Application of Fuzzy Probability in Comprehensive Evaluation of Cotton Varieties [J]. Acta Agronomica Sinica, 1992(6): 458.
- [18] 许友谊, 林嗽. 喷灌自吸泵质量现状及分析 [J]. 排灌机械工程学, 1992(1): 60.
- XU Youyi, LIN Tun. Quality Status and Analysis of Sprinkler Irrigation Self-priming Pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 1992(1): 60.

(编辑: 温泽宇)