

# 基于灰色模糊算法的机床产品制造系统能效评价方法<sup>①</sup>

毛志慧, 王 艳

(江南大学 物联网工程学院, 无锡 214122)

**摘 要:** 针对机床产品制造系统具有能耗主体构成的多样性、复杂性、以及动态变化的随机性的特点, 从经济、产品、设备和任务流程 4 个方面, 归纳出了 10 个评价指标, 构建了机床产品制造系统能效评价指标体系. 本文提出了一种组合能效评价方法, 在确定权重的环节采用粗糙集-AHM 组合的方法, 充分综合了客观与主观两方面的指标权重值, 在其他环节应用了灰色关联法和模糊评价法, 克服了能效评价过程中的灰色性和不确定性. 最后, 通过实例分析和仿真对比验证了该能效评价方法的可行性、稳定性.

**关键词:** 机床产品制造系统; 评价指标体系; 组合评价方法

## Energy Efficiency Evaluation of Machine Tool Manufacturing System Based on Grey Fuzzy Algorithm

MAO Zhi-Hui, WANG Yan

(College of the Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** For machine tool manufacturing system has the characteristic of diversity, complexity and randomness of dynamic variety in main body of energy consumption structure, ten evaluation indexes are concluded from four aspects including economy, products equipments and task flow, and energy efficiency evaluation index construction of machine tool manufacturing system is structured. In this paper, a combination evaluation method of energy efficiency is proposed. The combination of Rough Sets and AHM is adopted in the step of determining weights, which combines the subjective and objective of weight value. Besides, the gray correlation method and grey fuzzy evaluation are used in other steps, to avoid grey and uncertainty. Lastly, living examples and simulation contrast experiment verify the feasibility and stability of the method.

**Key words:** machine tool manufacturing system; evaluation index construction; combination evaluation method

## 引言

制造业作为国民经济的支柱产业, 在创造巨大经济财富的同时, 也消耗了大量制造资源特别是能源, 并造成了对环境的严重影响. 能源问题已成为制约经济和社会发展的直观因素, 从对能源利用的方向出发, 节能成为重中之重. 典型的机床制造系统的基本构成要素可以分为生产环境、生产设备、生产对象、操作者四个部分. 制造系统在生产过程中消耗的能量可以分为直接能量和间接能量, 直接能量是制造产品的各种过程消耗的能量, 间接能量是为了维护车间内的生产环境需要消耗的能量<sup>[1]</sup>.

加强企业能效评价、提高系统制造系统能量效率已成为制造业的当务之急. 能效评价, 即对企业生产过程中的能效利用情况进行评价, 促使企业改进生产工艺和管理方式, 从而有利用提高能源利用效率, 节约能源. 制造系统能效评价包括制造系统能量消耗状态及能量消耗过程的分析评价以及在此基础上对能量效率的评价<sup>[2]</sup>. 提高能源利用效率的前提是了解用能系统本身的用能情况, 因此研究能效测评方法, 建立完善的能效评估指标体系具有现实意义. 制造过程绿色化也是我国未来的重点发展方向, 是国家对环保的迫切需求<sup>[3]</sup>.

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2014AA041505)

收稿时间: 2015-09-05; 收到修改稿时间: 2016-02-25 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005328]

目前国内外各项节能技术的研究日益深化,但针对具体的用能系统能效测评缺乏完整有效的评价体系,难以对各类设备节能效果给予全面的、准确的评估.国内外科研工作者已将多种综合评价方法应用于机床产品制造系统的能效评价中,主要包括层次分析法(AHM)、专家权重评价法、模糊综合评价法(Fuzzy)、熵值法、三种组合评价方法(AHM-GF)<sup>[4]</sup>和灰色关联度法(Grey)<sup>[5]</sup>等.

### 1 机床产品制造系统能效评价指标体系建立

针对制造系统的能效测评的基本流程,主要包括前期基础资料搜集,筛选能效评价指标,现场测试与数据采集,数据的整理与分析,建立综合能效评估模型<sup>[5]</sup>,如图 1 所示.

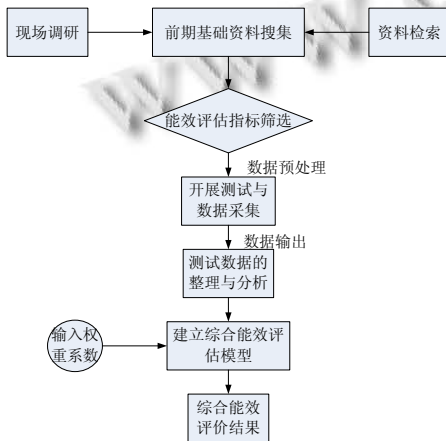


图 1 能效评价流程

评价指标的选取必须注意评价的目的性、全面性、稳定性与可行性原则,评价指标的确定要以实际情况为基础<sup>[6,7]</sup>,这里选取经济能效、产品能效、设备能效和任务流程能效 4 个一级指标和 10 个二级指标建立能源评价指标体系,全面涵盖了机床产品制造系统、产品层、设备层和任务层各指标,而传统的机床产品制造系统能效评价体系,忽略了生产工艺能效和生产资源调度能效.如图 2 所示,为整个指标体系的层次结构<sup>[8]</sup>.

## 2 能效评价方法

### 2.1 确定评价因素集 C

评价因素集合为底层的 10 个指标,即综合评估的因素集为  $C = \{C_1, C_2 \dots C_{10}\}$ .

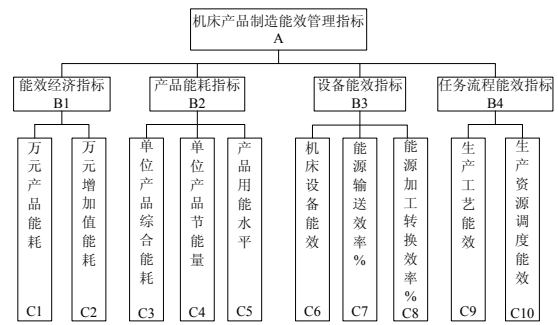


图 2 综合评价指标体系

### 2.2 确定指标的权重集合 W

采用主观权重计算方法的主观随意性大,容易受专家经验、知识的影响,常不能客观地反映实际情况,常用的主观权重计算方法主要有层次分析法、模糊统计等<sup>[9]</sup>.一些学者提出基于客观数据的权重计算方法,如粗糙集、均方差法、因子分析法、熵值法等,虽然这些方面在一定程度上克服了受专家主观因素的影响,但却也容易受样本数据的选择影响,特别是当样本数据不够全面的情况,所获得的权重将严重偏离现实.因此,本文提出一种基于粗糙集—AHM 的企业创新能力评价指标确定的综合计算方法.该方法一方面利用粗糙集理论在处理不确定、不精确数据的优势,能够获得较为客观的指标权重信息;另一方面利用 AHM 能够充分利用领域专家的经验,获得专家对指标客观的重要性评价结果,克服 AHP 在评价时对一致性检验要求较高的不足.

#### 2.2.1 基于粗糙集理论的权重计算方法

在决策表  $S = (U, C, D, V, f)$  中,决策属性  $D(U/D = \{D_1, D_2, \dots, D_k\})$  相对于条件属性集  $C(U/C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\})$  的条件信息熵为<sup>[10-13]</sup>

$$I(D|C) = \sum_{i=1}^m \frac{|C_i|^2}{|U|^2} \sum_{j=1}^k \frac{|D_j \cap C_i|}{|C_i|} \left( 1 - \frac{|D_j \cap C_i|}{|C_i|} \right) \quad (1)$$

在决策表  $S = (U, C, D, V, f)$  中,  $\forall c \in C$ , 则条件属性(指标)  $C$  的重要度定义为

$$Sig(c) = I(D|C - \{c\}) - I(D|C) \quad (2)$$

在决策表  $S = (U, C, D, V, f)$  中,  $\forall c \in C$ , 则条件属性(指标)  $C$  的权重为<sup>[13]</sup>

$$W_{A_i}(c) = \frac{Sig(c) + I(D|\{c\})}{\sum_{a \in C} \{Sig(a) + I(D|\{a\})\}} \quad (3)$$

#### 2.2.2 基于 AHM 的权重计算方法

(1)计算同层元素之间的相对重要性,建立判断矩

阵  $A = \{a_{ij}\}$ , 其中  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ ,  $a_{ii} = 1$ .

(2) 将  $A = \{a_{ij}\}$  通过公式转化为测度矩阵<sup>[13]</sup>

$$\mu = \begin{cases} \frac{\beta k}{\beta k + 1} & a_{ij} = k \\ \frac{1}{\beta k + 1} & a_{ij} = \frac{1}{k} \\ 0.5 & a_{ij} = 1, i \neq j \\ 0 & a_{ij} = 1, i = j \end{cases} \quad (4)$$

$K$  为大于 1 的正整数, 取  $\beta = 1$

(3) 计算单层指标权重, 得到每层指标相对于其上层指标的加权子集:  $W = [w_1, w_2 \dots w_{10}]$ ,

$$w_i = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n \mu_{ij}, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, 0 \leq w_i \leq 1 \quad n = 10 \quad (5)$$

(4) 计算底层元素的组合权重

$$w_j = w_i * w_{ij} \quad (6)$$

$w_j$  表示第  $j$  项子目标对于总目标的组合权重,  $w_i$  表示第  $i$  项子目标的组合权重,  $w_{ij}$  表示第  $j$  项子目标对第  $i$  项子目标的权重, 其中第  $i$  项子目标位于第  $j$  项子目标的上一层. 组合权重主要用来分析各个指标的之间的重要性, 不用于后面的计算.

### 2.2.3 评价指标综合权重计算函数构建

利用粗糙集与 AHM 方法分别获得客观、主观两个方面的指标权重值, 利用粗糙集理论可以处理不确定、不精确的数据, 克服了受专家主观因素的影响, 却也容易受样本数据的选择影响, 特别是当样本数据不够全面的情况, 所获得的权重将严重偏离现实. 而 AHM 方法可以充分利用专家的经验, 但是受人为影响很大, 不能客观反映样本权重. 因此对两者进行综合, 获得最后指标权重值, 得到一组最终的评价指标权重.

$$W = \mu w_{Ai} + (1 - \mu) w_{Bi} \quad (7)$$

其中,  $w_{Ai}$  是指客观权重值,  $w_{Bi}$  是指主观权重值,  $\mu$  的取值根据具体情况而定, 当决策倾向专家经验时,  $\mu \in [0, 0.5]$ , 而当决策倾向客观数据时,  $\mu \in [0.5, 1]$ . 最后计算所得到的权重, 即为由主观和客观权重综合计算所得到的最后指标评价中的权重.

### 2.3 定量指标的无量纲化处理

对于定量指标而言, 由于各指标的计量单位、量

级不同, 须对原始数据指标进行无量纲化处理, 以减少随机因素的干扰<sup>[14]</sup>. 设第  $k$  个指标的原始数据值为  $c_k^i$ , 则要经过式 (8) 进行无量纲化处理,  $C_i(k) \in (0, 1)$

$$C_i(k) = \frac{c_k^j - \min c_k^j}{\max c_k^j - \min c_k^j} \quad (8)$$

$$i = 1, 2 \dots n, \quad k = 1, 2 \dots m$$

### 2.4 定性指标的定量化处理

对于定性指标, 必须要把定性指标转化为定量指标, 本文采用分级打分法, 对每级赋予一个分值, 若等级为“优、良、中、差”, 则分值分别为“4、3、2、1”.

### 2.5 单指标模糊评价

从单个指标出发, 确定评价对象对评价集元素的隶属度. 从  $U$  到  $F(V)$  的模糊映射:

$$f: U \rightarrow F(V), \forall u_i \in U, u_i \mapsto f(u_i) = \frac{r_{i,1}}{c_1} + \frac{r_{i,2}}{c_2} + \dots + \frac{r_{i,m}}{c_m} \quad (9)$$

式中,  $r_{i,j}$  表示  $u_i$  属于  $c_j$  的隶属度.

确定隶属函数的方法有函数推理法、二元对比排序法、模糊统计法、三分法以及模糊分布法等<sup>[15]</sup>. 本文采用三角形隶属模型. 隶属函数如下<sup>[16, 17]</sup>:

适用于值越小越好的指标. 隶属函数模型如下:

$$u_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ (x - a_2) / (a_1 - a_2) & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases}$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_1 \text{ or } x \geq a_3 \\ (x - a_1) / (a_2 - a_1) & a_1 < x < a_2 \\ (x - a_3) / (a_2 - a_3) & a_2 < x < a_3 \end{cases}$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_2 \\ (x - a_2) / (a_3 - a_2) & a_2 < x \leq a_3 \\ 1 & x > a_3 \end{cases}$$

适用于值越大越好的指标. 隶属函数模型如下:

$$u_1(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_2 \\ (x - a_2) / (a_1 - a_2) & a_2 < x \leq a_1 \\ 1 & x > a_1 \end{cases}$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_3 \text{ or } x \geq a_1 \\ (x - a_3) / (a_2 - a_3) & a_3 < x \leq a_2 \\ (x - a_1) / (a_2 - a_1) & a_2 < x < a_1 \end{cases}$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_3 \\ (x - a_2) / (a_3 - a_2) & a_3 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases}$$

适用于值应在某固定区间的因素. 隶属函数模型如下:

$$u_1(x) = \begin{cases} 1 & a_{11} \leq x \leq a_{12} \\ (x-a_{11})/(a_{11}-a_{21}) & a_{21} \leq x < a_{11} \\ (x-a_{22})/(a_{12}-a_{22}) & a_{12} < x < a_{22} \\ 0 & x < a_{21} \text{ or } x > a_{22} \end{cases}$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_{31} \text{ or } x \geq a_{32} \text{ or } a_{11} \leq x \leq a_{12} \\ (x-a_{31})/(a_{21}-a_{31}) & a_{31} < x < a_{11} \\ (x-a_{11})/(a_{21}-a_{11}) & a_{21} \leq x < a_{11} \\ (x-a_{12})/(a_{22}-a_{12}) & a_{12} \leq x < a_{22} \\ (x-a_{32})/(a_{22}-a_{32}) & a_{22} \leq x < a_{32} \end{cases}$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_{31} \text{ or } x \geq a_{32} \\ (x-a_{11})/(a_{11}-a_{21}) & a_{31} < x < a_{21} \\ (x-a_{22})/(a_{12}-a_{22}) & a_{22} < x < a_{32} \\ 0 & a_{21} \leq x \leq a_{22} \end{cases}$$

$u_1, u_2, u_3$  是表示单因素好中差的隶属度, 且  $u_1, u_2, u_3$  满足如下关系:

$$u_1 + u_2 + u_3 = 1 \quad (10)$$

由  $f(u_i)$  可得到单因素评价集:

$$R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \quad (11)$$

根据单因素评价集, 得出定性的评价结果.

### 2.6 一级灰色综合评价

最优指标集为:  $C^* = [c_1^*, c_2^*, \dots, c_m^*]$  原始评价矩阵为:

$$D = \begin{bmatrix} c_1^* & c_2^* & \dots & c_m^* \\ c_1^1 & c_2^1 & \dots & c_m^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_1^n & c_2^n & \dots & c_m^n \end{bmatrix}$$

式中,  $m$  为决策指标数量,  $n$  为可选方案数量,  $c_k^*$  为第  $k$  个指标的最优值,  $c_k^i$  为第  $i$  个方案中第  $k$  个指标的原始值<sup>[18]</sup>.

可得出两极最小差:

$$TOW_{\min} = \min_i \min_k |c_k^* - c_k^i| \quad (12)$$

两极最大差:

$$TOW_{\max} = \max_i \max_k |c_k^* - c_k^i| \quad (13)$$

灰色关联系数为:

$$L_i^k = \frac{TOW_{\min} + \rho TOW_{\max}}{|c_k^* - c_k^i| + \rho TOW_{\max}} \quad \rho \in (0, 1) \quad (14)$$

评价矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} L_1(1) & L_2(1) & \dots & L_n(1) \\ L_1(2) & L_2(2) & \dots & L_n(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_1(m) & L_2(m) & \dots & L_n(m) \end{bmatrix} \quad (15)$$

最后灰色综合评价:

$$J = W \times R \quad (16)$$

式中,  $W$  为权重矩阵,  $R$  为评价矩阵

### 2.7 多级灰色综合评价

若指标有  $n$  层, 则要进行  $n$  级灰色综合评价,  $c_i$  作为一个评价指标, 用  $J_i$  作为它的单指标评价集  $J = W \times R = [J_1, J_2, \dots, J_s]$ . 当指标有两层且每层有多个指标时, 先对第二层指标进行单指标模糊评价, 再由第二层指标对第一层指标进行一级灰色综合评价, 再由第一层指标的一级灰色综合评价结果对第二层指标进行二级灰色综合评价, 评价结果即为系统评价结果<sup>[19]</sup>.

## 3 实例分析及仿真对比

本文选取甲、乙两家机床制造企业作为评价对象进行综合评价, 各指标的具体数值如下表 1 所示.

表 1 各指标的数值

一级指标	二级指标	甲	乙
能效经济指标	万元产品能耗	2.5	3.2
	万元增加值能耗	3.7	5.1
产品能耗指标	单位产品综合能耗	8.9	9.2
	单位产品节能量	4.9	2.6
	产品用能水平	良	中
设备能效指标	机床设备能效	0.4	0.5
	能源输送效率(%)	67	55
	能源加工转换效率(%)	60	65
任务流程能效指标	生产工艺能效	0.5	0.8
	生产资源调度能效	0.6	0.6

### 3.1 确定指标的权重集合 $W$

#### 3.1.1 计算基于粗糙集理论的权重

根据公式(2)先计算各指标的重要度:

$$\begin{aligned} sig(B_1) &= \frac{9}{34} & sig(B_2) &= \frac{7}{34} \\ sig(B_3) &= \frac{8}{34} & sig(B_4) &= \frac{10}{34} \end{aligned}$$

二级指标:

$$\begin{aligned} sig(C_1) &= 0.618 & sig(C_2) &= 0.382 \\ sig(C_3) &= 0.323 & sig(C_4) &= 0.31 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} sig(C_5) &= 0.367 & sig(C_6) &= 0.439 \\ sig(C_7) &= 0.412 & sig(C_8) &= 0.149 \\ sig(C_9) &= 0.34 & sig(C_{10}) &= 0.66 \end{aligned}$$

再根据公式(3)计算权重:

$$\begin{aligned} w &= [0.26 \ 0.21 \ 0.241 \ 0.289] \\ w_1 &= [0.63 \ 0.37] \\ w_2 &= [0.30 \ 0.33 \ 0.37] \\ w_3 &= [0.452 \ 0.41 \ 0.138] \\ w_4 &= [0.52 \ 0.48] \end{aligned}$$

根据公式(2)、(3)计算出组合权重:

$$\begin{aligned} w(C_1) &= \frac{3}{25} & w(C_2) &= \frac{3}{25} & w(C_3) &= \frac{1}{25} \\ w(C_4) &= \frac{2}{25} & w(C_5) &= \frac{3}{25} & w(C_6) &= \frac{3}{25} \\ w(C_7) &= \frac{3}{25} & w(C_8) &= \frac{1}{25} & w(C_9) &= \frac{3}{25} \\ w(C_{10}) &= \frac{3}{25} \end{aligned}$$

### 3.1.2 计算基于 AHM 的权重

单层指标权重:

$$\begin{aligned} w &= [0.251 \ 0.263 \ 0.244 \ 0.242] \\ w_1 &= [0.6 \ 0.4] \\ w_2 &= [0.251 \ 0.372 \ 0.377] \\ w_3 &= [0.491 \ 0.302 \ 0.207] \\ w_4 &= [0.392 \ 0.608] \end{aligned}$$

组合权重:

$$\begin{aligned} \tilde{w}_1 &= [0.128 \ 0.109] \\ \tilde{w}_2 &= [0.076 \ 0.083 \ 0.092] \\ \tilde{w}_3 &= [0.117 \ 0.113 \ 0.046] \\ \tilde{w}_4 &= [0.107 \ 0.129] \end{aligned}$$

### 3.1.3 计算最终的权重

通过粗糙集与 AHM 分别获得主客观评价指标的权重, 计算组合评价, 根据公式(7)  $W = \mu w_{Ai} + (1 - \mu) w_{Bi}$ , 取  $\mu = 0.62$ , 结果偏向客观权重, 综合权重如表 2、3 所示。

表 2 各二级指标的权重

指标	客观权重	主观权重	综合权重
能效经济	0.26	0.251	0.257
产品能效	0.21	0.263	0.230
设备能效	0.241	0.244	0.242
任务流程	0.289	0.242	0.271

能效经济	$C_1$	0.63	0.6	0.62
	$C_2$	0.37	0.4	0.38
产品能效	$C_3$	0.30	0.251	0.281
	$C_4$	0.33	0.372	0.346
	$C_5$	0.37	0.377	0.373
设备能效	$C_6$	0.452	0.491	0.467
	$C_7$	0.41	0.402	0.369
	$C_8$	0.138	0.207	0.164
任务流程	$C_9$	0.52	0.392	0.471

表 3 各一级指标的权重

指标	客观权重	主观权重	综合权重	
能效经济	$B_1$	0.26	0.251	0.257
产品能效	$B_2$	0.21	0.263	0.230
设备能效	$B_3$	0.241	0.244	0.242
任务流程	$B_4$	0.289	0.242	0.271

由此可以看出任务流程能效指标是机床产品制造系统能效评价的重要因素。

一级指标权重

$$W = [0.257 \ 0.230 \ 0.242 \ 0.271]$$

二级指标权重

$$\begin{aligned} W_1 &= [0.62 \ 0.38] \\ W_2 &= [0.281 \ 0.346 \ 0.373] \\ W_3 &= [0.467 \ 0.369 \ 0.164] \\ W_4 &= [0.471 \ 0.529] \end{aligned}$$

### 3.2 定量指标的无量纲化处理

根据公式(8), 对甲机床厂的各指标经过无量纲化处理得出:

$$C = [0.36 \ 0.13 \ 0.77 \ 0.85 \ 0.66 \ 0.5 \ 0.75 \ 0.5 \ 0.25 \ 1]$$

对乙机床厂各指标经过无量纲化处理得出:

$$C = [0.58 \ 0.64 \ 0.62 \ 0.036 \ 0.33 \ 1 \ 0.24 \ 0.9 \ 1 \ 0.5]$$

### 3.3 确定定性指标的分值

甲、乙机床厂的产品用能水平等级为“良”、“中”, 对应的分值为 3、2。

### 3.4 单指标模糊评价

确定各指标的隶属度, 通过计算得:

$$R_i = [0.5 \ 0.6 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.6 \ 0.7 \ 0.4 \ 0.5 \ 0.4 \ 0.5]$$

### 3.5 一级灰色综合评价

确定最优指标集  $C^*$ ，并经过定量指标的无量纲化处理和定性指标的定量化处理：

$$C^* = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

根据公式(12)、(13)计算得： $TOW_{\min} = 0$

$$TOW_{\max} = 0.964$$

根据公式(14)，取  $\rho = 0.5$  计算得：

$$L_1(1) = 0.57 \quad L_1(2) = 0.79 \quad L_1(3) = 0.38$$

$$L_1(4) = 0.76 \quad L_1(5) = 0.59 \quad L_1(6) = 0.49$$

$$L_1(7) = 0.66 \quad L_1(8) = 0.49 \quad L_1(9) = 0.39$$

$$L_1(10) = 1 \quad L_2(1) = 0.45 \quad L_2(2) = 0.43$$

$$L_2(3) = 0.44 \quad L_2(4) = 0.33 \quad L_2(5) = 0.43$$

$$L_2(6) = 1 \quad L_2(7) = 0.39 \quad L_2(8) = 0.83$$

$$L_2(9) = 1 \quad L_2(10) = 0.49$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.57 & 0.45 \\ 0.79 & 0.43 \\ 0.38 & 0.44 \\ 0.76 & 0.33 \\ 0.59 & 0.43 \\ 0.49 & 1 \\ 0.66 & 0.39 \\ 0.49 & 0.83 \\ 0.39 & 1 \\ 1 & 0.49 \end{bmatrix}$$

根据公式  $J = W \times R$  得

$$J_1 = [0.629 \ 0.38] \times \begin{bmatrix} 0.57 & 0.45 \\ 0.79 & 0.43 \end{bmatrix} = [0.654 \ 0.442]$$

表 4 待评估方案指标值

方案	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$
一	0.7	0.74	0.81	0.9	1	0.66	0.68	0.59	0.75	0.6
二	0.88	0.8	1	0.72	0.6	0.8	0.85	0.69	0.71	0.59
三	0.6	0.69	0.59	0.7	0.75	0.9	0.66	0.74	0.65	0.7
四	0.72	0.87	0.58	0.61	0.63	0.64	1	0.64	0.65	0.9
五	0.9	0.64	0.94	0.82	0.8	0.72	0.65	0.86	0.59	0.67
六	0.66	0.65	1	0.8	0.91	0.77	0.7	0.82	0.9	0.61

方案四的  $C_3$  为全局极小值，为了对比一般的灰色模糊能效评估方法与文中改进的灰色模糊能效评估方法对于极值的敏感程度，将  $C_3$  从 0.58 调整到 0.3，

$$J_2 = [0.281 \ 0.346 \ 0.373] \times \begin{bmatrix} 0.38 & 0.44 \\ 0.76 & 0.33 \\ 0.59 & 0.43 \end{bmatrix} = [0.59 \ 0.398]$$

$$J_3 = [0.467 \ 0.369 \ 0.164] \times \begin{bmatrix} 0.49 & 1 \\ 0.66 & 0.39 \\ 0.49 & 0.83 \end{bmatrix} = [0.553 \ 0.747]$$

$$J_4 = [0.471 \ 0.529] \times \begin{bmatrix} 0.39 & 1 \\ 1 & 0.49 \end{bmatrix} = [0.713 \ 0.73]$$

### 3.6 二级灰色综合评价

$R = [J_1 \ J_2 \ J_3 \ J_4]^T$ ，根据公式

$$J = W \times R, \quad J = [0.63 \ 0.58]$$

根据计算分析可得，甲机床厂的企业能效为 0.63，乙机床厂的企业能效为 0.58。甲、乙机床厂的能效综合评价等级都属于中级，四个二级指标能效经济能效指标、产品能效指标、设备能效指标、任务流程能效指标中产品能效指标其最主要的作用，乙机床厂的设备能效指标、任务层能效指标与甲机床厂相比差距较大。乙机床厂应在设备能效指标、任务层能效指标上加以重点改进，设备上需要更换或改进，任务流程上可能需要改进工艺路线或车间调度方法。

### 3.7 仿真分析

选取六组数据，即有六个待评估方案  $\{y^1, y^2, y^3, y^4, y^5, y^6\}$ ，每个方案有 10 个指标  $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9, C_{10}\}$ 。

假设经过无量纲化处理后：

最优理想指标集为  $\{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$ ，最劣指标集为  $\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 。各方案指标值如表 4 所示。

再调整到 0.1，评估的结果如图 3、4 所示。

根据对比的结果来看，在改变全局极值的情况下，除了方案四，改进的灰色模糊算法的其他方案评估结

果,基本与之前重合,变化不大,而灰色模糊算法波动明显.因此,改进的灰色模糊算法更稳定.

灰色模糊算法在极小值从 0.58 调整到 0.3 时,各方案的评价结果对极值的敏感度约 25%,极值由 0.3 调整到 0.1 时,敏感度约为 29%,改进的灰色模糊算法的敏感度仅为约 5%,对于极值的变化相对不敏感;改进的灰色模糊算法也体现了方案四本身指标数值的变化对评估结果的影响.说明评估结果在确保稳定性的同事也涵盖了指标的信息,具有一定的科学性、可行性.

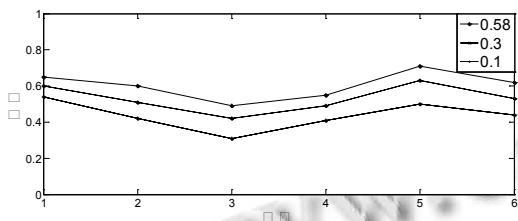


图3 灰色模糊算法能效评价结果

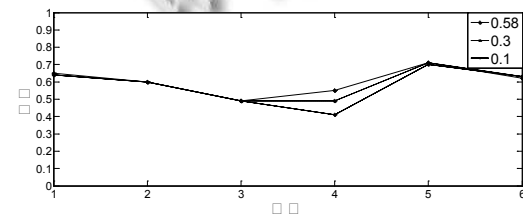


图4 改进的灰色模糊算法能效评价结果

#### 4 结束语

对离散制造业来说,耗能巨大,节能是重中之重,所以对企业进行能效评价是必须的.国内关于离散制造系统的能效评价方法的研究还比较少,因此本文提出了一种改进的灰色模糊能效分析方法,较好地克服了能效评价过程中的主观性和客观性.该方法是科学,合理的,企业通过计算能效,可以有针对性地进行能效改进,推进绿色制造.该方法也有不足,当指标项较多时,需要大量的样本才能得到客观指标权重,综合主客观的指标权重时, $\mu$ 值由专家确定,易受主观因素影响,在以后的研究中有待改进.

#### 参考文献

- 1 王峻峰,李世其,刘继红.能量有效的离散制造系统研究综述.机械工程学报,2013,49(11):89-97.
- 2 刘飞,王秋莲.机械制造系统能效评价的特点、研究现状及发展趋势.中国机械工程,2013,(11):1550-1556.
- 3 郑力,江平宇,乔立红等.制造系统研究的挑战和前沿.机械

- 4 苑帅,王坚,戴毅茹.基于组合评价方法(AHM-GF)的制造企业综合能效评价研究.制造业自动化,2009,31(3):20-23.
- 5 Pandey RK, Panda SS. Optimization of bone drilling parameters using grey-based fuzzy algorithm. Measurement, 2014, 47(1): 386-392.
- 6 Aqueveque P, Wiechmann EP, Henriquez JA, et al. Energy quality and efficiency of an open pit mine distribution system: An evaluation. Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE. 2014. 1-7.
- 7 Iino Y. Consideration on systematic analysis and evaluation of energy system efficiency. 2011 Proc. of SICE Annual Conference (SICE). IEEE. 2011. 1390-1391.
- 8 Wang Q, Liu F, Li C. An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop. Journal of Cleaner Production, 2013, 52(4): 122-133.
- 9 张晓明.基于粗糙集-AHM 的装备制造业企业创新能力评价指标权重计算研究.中国软科学,2014,(6):151-158.
- 10 谭宗凤.基于粗糙集的权重确定方法研究[学位论文].桂林:广西师范大学,2012.
- 11 Pei D, Xu ZB. Transformation of rough set models.. Knowledge-Based Systems, 2007, 20(8):745-751.
- 12 Mi JS, Leung Y, Zhao HY, et al. Generalized fuzzy rough sets determined by a triangular norm. Information Sciences, 2008, 178(16): 3203-3213.
- 13 姜长虹,何天荣,屈玉华,等.基于粗糙集理论的规则权重确定方法.甘肃联合大学学报:自然科学版,2008,22(6):35-37.
- 14 Alonso JA, Lamata MT. Consistency in the analytic hierarchy process: A new approach. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2011, 14(4): 445-459.
- 15 Lin JL, Lin CL. The use of grey-fuzzy logic for the optimization of the manufacturing process. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(1): 9-14.
- 16 Chakraborty MK. Membership function based rough set. International Journal of Approximate Reasoning, 2014, 55(1): 402-411
- 17 Pedrycz W, Vukovich G. On elicitation of membership functions. IEEE Trans. on Systems Man & Cybernetics Part A Systems & Humans, 2002, 32: 761-767.
- 18 李杰,郁玮.一种基于 TOPSIS 思想的改进灰色关联法及其在方案评估中的应用.数学的实践与认识,2013,43(8).
- 19 刘维学.系统评价指标体系与灰色模糊评价模型构建.计算机技术与发展,2013,(10):193-196.