

6-2-2020

## Energy Efficiency Evaluation of Discrete Manufacturing System Based on Improved Entropy Method

Zhuqing Peng

*College of the Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Wang Yan

*College of the Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Zhicheng Ji

*College of the Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Energy Efficiency Evaluation of Discrete Manufacturing System Based on Improved Entropy Method

## Abstract

**Abstract:** For the characteristic of dynamic change randomness, variety, complexity and diversity in discrete manufacturing system, nine evaluation indexes were concluded from four aspects including product, equipment, economy and task flow, and energy efficiency evaluation index construction of discrete manufacturing system was structured. *An improved entropy method was proposed. As the discrete degree of an index was too large when the entropy method was used to assign weight, the weight of the index would be very large. The idea of Analytic Hierarchy Model was used to improve the entropy method. So the improved entropy method could evaluate the discrete manufacturing system more scientifically.* Living examples verify the feasibility and stability of this method.

## Keywords

discrete manufacturing system, evaluation index construction, entropy method, energy efficiency evaluation

## Recommended Citation

Peng Zhuqing, Wang Yan, Ji Zhicheng. Energy Efficiency Evaluation of Discrete Manufacturing System Based on Improved Entropy Method[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 2121-2127.

# 基于改进熵值法的离散制造系统能效评价方法

彭竹清, 王艳, 纪志成

(江南大学物联网工程学院, 无锡 214122)

**摘要:** 针对离散制造系统具有能耗主体构成的动态变化随机性、多样性、以及复杂性的特点, 从产品、设备、经济和任务流程 4 个方面, 归纳出 9 个评价指标, 建成了离散制造系统能耗评价指标体系。该方法基于改进熵值法的能效评价方法, 针对熵值法在赋权时当某个指标的离散程度太大时, 该指标会出现权重过大这一问题, 借层次分析法的赋权思路, 将主客评价结合起来, 更好的对离散制造系统进行科学的评价。通过实例分析与仿真来对比验证该能效方法的稳定性、可行性。

**关键词:** 离散制造系统; 评价指标体系; 熵值法; 能效评价

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 09-2121-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201709033

## Energy Efficiency Evaluation of Discrete Manufacturing System Based on Improved Entropy Method

Peng Zhuqing, Wang Yan, Ji Zhicheng

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

**Abstract:** For the characteristic of dynamic change randomness, variety, complexity and diversity in discrete manufacturing system, nine evaluation indexes were concluded from four aspects including product, equipment, economy and task flow, and energy efficiency evaluation index construction of discrete manufacturing system was structured. An improved entropy method was proposed. As the discrete degree of an index was too large when the entropy method was used to assign weight, the weight of the index would be very large. The idea of Analytic Hierarchy Model was used to improve the entropy method. So the improved entropy method could evaluate the discrete manufacturing system more scientifically. Living examples verify the feasibility and stability of this method.

**Keywords:** discrete manufacturing system; evaluation index construction; entropy method; energy efficiency evaluation

## 引言

离散制造系统是生产机械产品及其零件的重要依托, 其能源消耗量是产品碳足迹的重要组成部分<sup>[1]</sup>。当今离散制造业作为国民经济的支柱性产

业, 它在创造出巨大的经济财富同时, 也消耗了巨大的制造资源, 并且对环境造成了非常严重的影响。能源问题已经成为影响社会和经济发展的的重要因素, 从能源利用的方向出发, 节能已经变成了重中之重。典型的离散制造系统的基本构成要素可分为生产环境、生产对象、生产设备、操作者 4 个部分。离散制造系统在生产过程当中消耗的能量可分为直接能量和间接能量, 直接能量就是制造产品所消耗的各种过程能量, 间接能量就是为了维持制造



收稿日期: 2017-05-18 修回日期: 2017-07-10;  
基金项目: 国家自然科学基金(61572238), 国家高技术研究发展计划(2014AA041505), 江苏杰出青年基金(BK201600);  
作者简介: 彭竹清(1993-), 男, 江苏无锡, 硕士生, 研究方向为离散制造能效优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 2121 •

车间内的生产环境所需要消耗的能量。

如何有效的加强企业的能效评价,提升制造系统的能量效率已经成为了当务之急。能效评价,就是对企业在整个生产过程当中的能量利用情况进行评价,促进企业改进当前的管理方式和生产工艺,从而更加有效的提高能源的利用效率,达到节约能源的目的<sup>[2]</sup>。要提升能源的利用效率的前提就是要了解系统本身用能的情况,所以研究能效评测的方法,建立起完善的能效评估指标体系是很有现实意义的。制造过程绿色化也是我国离散制造业发展的重点发展方向,是国家对环保的迫切需求<sup>[3]</sup>。

国内外在离散系统能效评价方面的研究正在逐步的深化。朱金环提出了一种专家量化分析法来对物流企业的供应链进行量化分析,专家量化分析法主要是根据专家打分的方法来对指标进行量化分析<sup>[4]</sup>。李娜娜等提出了一种基于组合赋权法的低压配电网能效综合量化分析方法,该方法实现了能效指标客观性与主观性的有机结合,使量化分析结果更加合理<sup>[5]</sup>。李杰等采用了一种改进灰色关联法,能够将灰色关联法给出的评估结果转换为TOPSIS方法所要用到的与最优最劣解的距离,从而给出一个稳定的评估结果。但是如今大部分离散制造系统的能效评价方法中权重的确定都比较片面。容易导致评价结果偏向于主观或者客观其中一面,导致了评价结果的不合理,因此本文提出一种基于改进熵值法的离散系统能效评价方法,充分综合了主观和客观两个方面的指标权重,克服权重确定中片面的问题,从而能进行更好的综合评价。最后通过实例分析与仿真来对比验证该能效方法的稳定性、可行性。

## 1 离散制造系统能效评价指标体系

离散制造系统的能效评估流程,主要包括基础资料搜集,筛选指标体系,现场数据的测试和采集,数据的后期整理与分析等,从而建立了离散制造系统的综合评估模型,如图1所示。

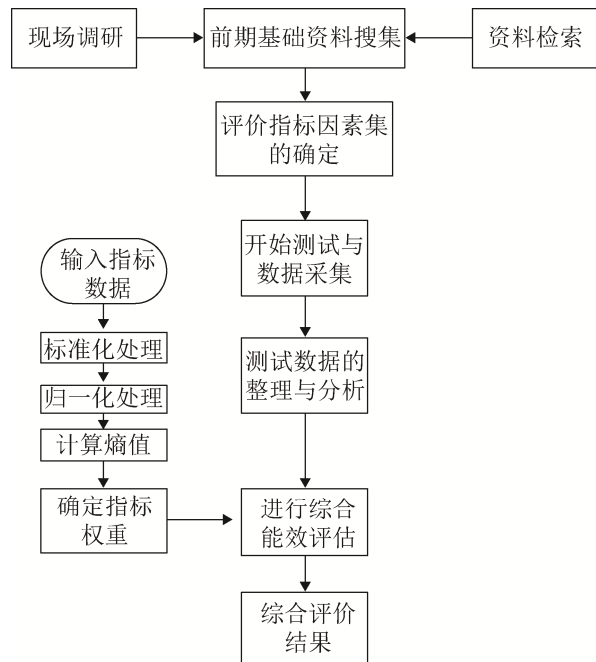


图1 能效评价流程

Fig. 1 Energy efficiency evaluation process

离散制造系统能效主要包括产品能效、经济能效、设备能效和任务流程能效4个方面。离散制造系统能效评价非常重要的因素是数据的采集,其主要的来源有操作设备的系统、智能电表和各种传感器的采集。评价指标的选取过程中必须注意评价的全面性、目的性、稳定性和可行性原则,评价指标的确定要以实际情况为基础<sup>[6]</sup>。本文选取产品能效、经济能效、设备能效和任务流程能效4个一级指标和9个二级指标建成能效评价指标体系,如图2所示。

(1) 万元产品能耗  $C_1 = E_1 / P_1$ 。其中,  $E_1$  是一批次产品总能耗(kWH),  $P_1$  是批次产品价格(万元);

(2) 万元增加值能耗  $C_2 = E_2 / P_2$ 。其中,  $E_2$  是能耗增加总量(kWH),  $P_2$  是工业增加值(万元);

(3) 单位产品综合能耗  $C_3 = E_1 / N$ 。其中,  $N$  是批次产品中产品个数;

(4) 产品节能量  $C_4 = E_{\text{last}} - E_{\text{now}}$ 。即生产同类且同量产品不同时刻的耗能差值;

(5) 机床设备能效  $C_5 = E_T / T$ 。其中,  $E_T$  是机床工作  $T$  时所耗能量(kWH);

(6) 能源输送效率  $C_6 = W_{sc} / W_{sr}$ 。其中,  $W_{sr}$  表示输入能量,  $W_{sc}$  表示输出能量;

(7) 能源加工转换效率  $C_7 = W_{cc} / W_{tr}$ 。其中,  $W_{cc}$  表示能源加工转换产出量,  $W_{tr}$  表示能源加工转换投入量;

(8) 生产工艺能效  $C_8 = E_{gy} / T_{gy}$ 。其中,  $E_{gy}$  表示加工某道工艺所耗能量,  $T_{gy}$  表示加工这道工艺的时间;

(9) 生产资源调度能效  $C_9 = W_{dd} / T_{dd}$ 。其中,  $E_{dd}$  表示调度所耗能量,  $T_{dd}$  表示调度所耗时间。

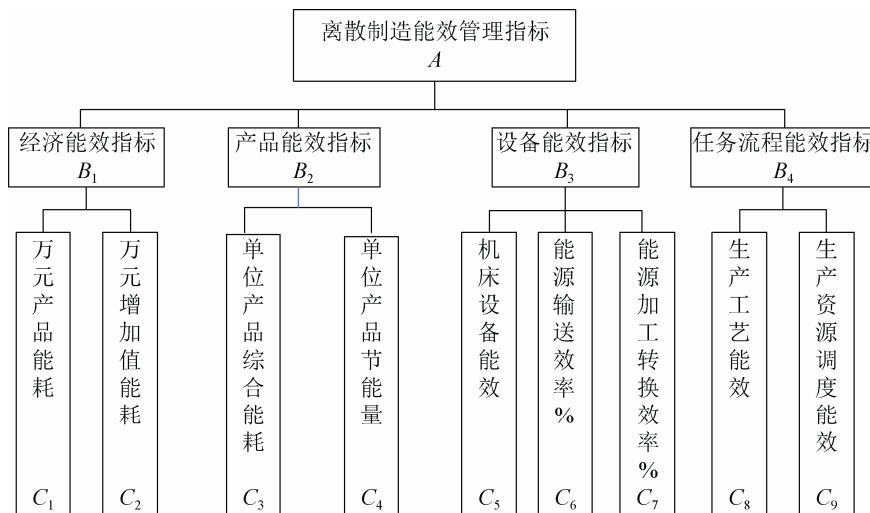


图 2 能效评价体系图  
Fig. 2 Energy efficiency evaluation system

## 2 能效评价方法原理和选取原因

能效评价中指标权重的确定具有举足轻重的地位, 指标权重确定的合理、科学, 评估结果的正确性和可靠性就高。指标赋权分为主观赋权法和客观赋权法<sup>[7]</sup>。主观赋权法是根据专家给出的对指标偏好的信息来计算权重, 常用的主观赋权法有 AHP, AHM, 专家评价法等。客观赋权法根据指标的数据信息来计算权重, 常用的客观赋权法有因子分析法、熵值法、主成份分析法等。本文为了使评价结果更加的客观和准确, 选用了客观赋权的熵值法。熵值法是常用的客观赋权法, 该方法赋权的意义明确、条例清晰, 而且对决策方案数及指标个数无限制。但在应用中会出现当某一指标离散程度较大时, 该指标的权重过大, 导致单一指标影响最终的评价结果<sup>[8]</sup>。本文借主观赋权法 AHM 法赋权的思想, 对熵值进行了改进, 充分综合了主观和客观两个方面的指标权重, 从而克服熵值法单一指标权重可能过大的问题。

### 2.1 应用层次分析法(AHM)确定指标的一级主观权重评价

层次分析模型(简称为 AHM), 是我国程乾生教授在层次分析法(AHP)的基础上提出的一种新型非结构化的决策方法, 相比于原来的 AHP 方法, AHM 有更加强的适用性<sup>[9]</sup>, 它能避免大量的计算过程, 所以本论文选取 AHM 来计算指标的主观权重。

为了计算同层间元素的相对重要性, 建立起判断矩阵  $A = \{a_{ij}\}$ , 式中  $a_{ij} = 1 / a_{ji}, a_{ii} = 1$ 。其中  $a_{ij}$  是根据专家知识所得到的重要度参数,  $a_{ij} \in \{1, 3, 5, 7, 9\}$ 。

$A = \{a_{ij}\}$  通过下列公式转化成测度矩阵:

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

其中:  $k$  是大于 1 的正整数, 这里取  $\beta=1$ 。

计算单层指标的权重,得到底层指标当比较上层指标的加权子集:

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_{10}]$$

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

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, 0 \leq w_i \leq 1, n=10$$

计算底层元素之间的组合权重:

$$w_j = w_i \times w_{ij} \quad (3)$$

式中:  $w_j$  为第  $j$  个子目标相对总目标的组合权重;  $w_i$  为第  $i$  个子目标的组合权重;  $w_{ij}$  为第  $j$  个子目标对  $i$  个子目标的权重, 其中第  $j$  个子目标位于第  $j$  个子目标的上一层<sup>[10]</sup>。其中组合权重是用来分析每个指标间的重要性, 并不用于后面的计算。

## 2.2 应用熵值法确定指标二级客观权重评价

建立层次结构的模型, 构建原始数据矩阵:

$$X = (X_{ij})_{m \times n} \quad (4)$$

式中:  $X$  表示原始评价的矩阵;  $X_{ij}$  表示指标值;  $m$  表示带评价的方案数;  $n$  为评价的指标数。

将各指标进行同度量化, 计算第  $j$  项指标下面的第  $i$  个方案的指标权重:

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m X_{ij} \quad (5)$$

式中:  $p_{ij}$  表示第  $j$  项指标下面的第  $i$  个方案的指标值权重。

计算第  $j$  项的指标熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

式中:  $e_j$  表示第  $j$  项指标的熵值,  $e_j \geq 0, k > 0$ ,  $k = 1 / \ln m$ 。

计算第  $j$  项指标差异性的系数:

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

式中:  $g_j$  表示第  $j$  项指标差异性的系数;  $e_j$  表示第  $j$  项指标的熵值。

计算底层的指标对上层准则的相对权重, 然后确定各层指标对于总目标的权重:

$$w_j = g_j / \sum_{i=1}^n g_j \quad (8)$$

式中:  $w_j$  为各项的指标权重;  $g_j$  表示第  $j$  项指标差异性的系数。

## 2.3 评价指标的三级综合权重的构建

利用 AHM 和熵值法分别获得主观、客观两个方面指标的权重值, 利用熵值法可以以客观数据为基础, 克服了受专家主观因素的影响, 但是也容易受到样本数据的影响。利用 AHM 法, 可以很好的利用专家的经验, 但是受到人为的影响很大, 不能客观的反映样本权重。所以对两种方法进行综合, 从而获得最后的指标权重, 最终得到一组评价指标权重。

$$W = \mu W_{AI} + (1 - \mu) W_{BI} \quad (9)$$

式中:  $W_{AI}$  为客观权重;  $W_{BI}$  表示主观权重。  $\mu$  的取值情况根据具体情况而定, 当决策倾向于专家的经验时,  $\mu \in [0.5, 1]$ , 当决策倾向于客观的数据时,  $\mu \in [0, 0.5]$ 。最后通过计算, 得到最终的指标评价权重。

## 2.4 对制造系统的原始定量进行无量纲化处理

对定量的指标来说, 各个指标的计量单位、量级不同。还需要对原始的能效数据进行无量纲化的处理, 来减少随机因素的干扰<sup>[11]</sup>。设第  $k$  项指标的原始能效数据为  $c_k^j$ , 则要经过无量纲化的处理, 具体见下式。其中处理过后的能效数据  $C_i(k) \in (0, 1)$ 。

$$C_i(k) = \frac{c_k^i - \min c_k^i}{\max c_k^i - \min c_k^i} \quad (10)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $k = 1, 2, \dots, m$ 。其中,  $n$  为可选的方案数量,  $m$  为决策指标的数量。

## 2.5 根据综合权重和无量纲化的数据进行综合评价

把无量纲化的处理后的每项的能效数据和综合权重相乘则得到最后的评分。

### 3 实例分析

本文选取甲乙两家机床厂制造企业作为评价的对象进行综合评价, 各数据通过指标体系计算得到  $C_1 \sim C_9$  的具体数值, 具体数值见表 1。

表 1 各指标的数值  
Tab. 1 Value of each index

一级指标	二级指标	甲	乙
经济能效指标	万元产品的能耗	2.5	3.2
	万元增加值的能耗	3.7	5.1
产品能效指标	单位产品的综合能耗	8.9	9.2
	单位产品的节能量	4.9	2.6
	机床设备的能效	0.4	0.5
设备能效指标	能源输送的效率/%	67	55
	能源加工转换效率/%	60	65
任务流程能效指标	生产工艺的能效	0.5	0.8
	生产资源调度的能效	0.6	0.6

计算基于 AHM 的权重:

根据公式(1), (2)计算出单层指标权重:

$w = [0.251 \ 0.263 \ 0.244 \ 0.242]$ ,  $w_1 = [0.6 \ 0.4]$ ,  
 $w_2 = [0.44 \ 0.56]$ ,  $w_3 = [0.491 \ 0.302 \ 0.207]$ ,  $w_4 = [0.392$   
 $0.608]$ 。

根据公式(3)计算出组合权重:

$\bar{w}_1 = [0.128 \ 0.109]$ ,  $\bar{w}_2 = [0.122 \ 0.129]$ ,

$\bar{w}_3 = [0.117 \ 0.113 \ 0.046]$ ,  $\bar{w}_4 = [0.107 \ 0.129]$

计算基于熵值法的权重:

根据公式(4)计算出原始矩阵为:

$$x = \begin{bmatrix} 2.5 & 3.7 & 8.9 & 4.9 & 0.4 & 67 & 60 & 0.5 & 0.6 \\ 3.2 & 5.1 & 9.2 & 2.6 & 0.5 & 55 & 65 & 0.8 & 0.6 \end{bmatrix}$$

根据公式(5)计算出同度量化的矩阵为:

$$p = \begin{bmatrix} 0.439 & 0.420 & 0.492 & 0.653 & 0.440 & 0.549 & 0.480 & 0.385 & 0.500 \\ 0.561 & 0.580 & 0.508 & 0.347 & 0.560 & 0.451 & 0.520 & 0.615 & 0.500 \end{bmatrix}$$

根据公式(6)计算后的熵值为:  $e_j = [0.989 \ 0.981$   
 $0.999 \ 0.931 \ 0.989 \ 0.993 \ 0.998 \ 0.961 \ 1]$ 。

根据公式(7)计算后的差异性系数为:  $g_j = [0.011$   
 $0.019 \ 0.001 \ 0.069 \ 0.011 \ 0.007 \ 0.002 \ 0.039 \ 0.000]$ 。

根据公式(8)总目标的权重为:  $w_j = [0.069 \ 0.119$   
 $0.006 \ 0.434 \ 0.069 \ 0.045 \ 0.012 \ 0.246 \ 0.000]$ 。

根据公式(9)计算综合权重:

通过 AHM 和熵值法分别获得主观权重评价指标和客观权重评价指标, 计算综合权重, 根据公式  $W = \mu W_{AI} + (1 - \mu) W_{BI}$ , 取  $\mu = 0.62$ , 结果偏向于客观权重, 综合权重为:  $w = [0.091 \ 0.115 \ 0.050 \ 0.318$   
 $0.080 \ 0.070 \ 0.024 \ 0.193 \ 0.059]$ 。

根据公式(10)对甲机床厂的各项数据进行无量纲化处理:

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

根据公式(10)对乙机床厂的各项数据进行无量纲化处理:

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

最后根据无量化的处理后的每项的数据和综合权重相乘则得到最后的评分:

根据计算可得, 甲机床厂能效为 0.568 3, 乙机床长能效为 0.509 7 指标评价结果如表 2 所示。

表 2 指标评价结果  
Tab. 2 Index evaluation result

指标评价结果	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
甲	0.047 7	0.308 8	0.104 5	0.107 3
乙	0.126 4	0.042 4	0.118 4	0.222 5

根据计算分析, 甲乙机床在综合能效方面差距不大, 但是 2 个厂却又是各自有自己擅长的方面。甲在产品能效方面远超过了乙机床厂, 说明乙厂在产品方面的加工工艺节能要加强。而乙机床厂则在任务流程能效和经济能效方面远超甲机床厂, 甲机床厂应该改进自己的车间调度方法。甲乙机床厂的设备购置时间相差不多, 所以甲乙设备能效几乎持平, 也说明本评测方法的合理性。

### 4 仿真分析

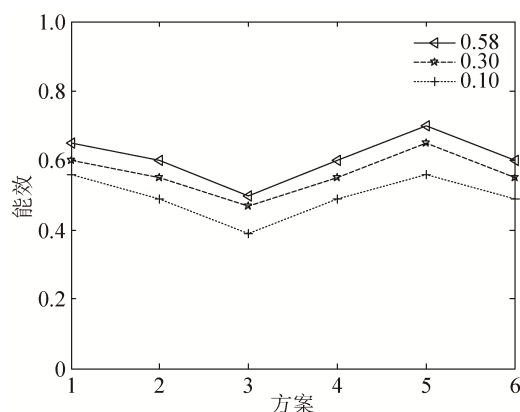
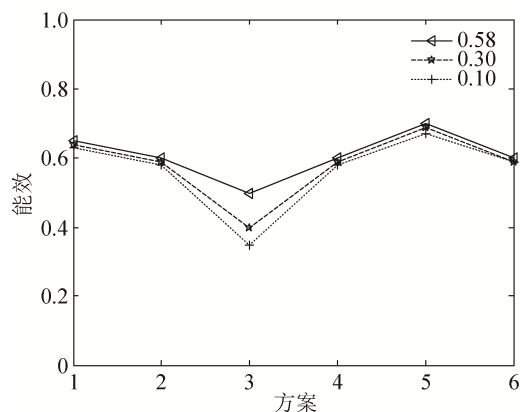
选取六组数据, 即有 6 个待评估的方案  $\{y^1, y^2, y^3, y^4, y^5, y^6\}$ , 每个方案有 9 个指标  $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9\}$ 。

假设经过无量化处理: 最优的理想指标集为  $\{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$ , 最劣的指标集为  $\{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 。各方案的指标值如表 3 所示。

表3 各方案的指标值  
Tab. 3 Index value of each scheme

	方案					
	1	2	3	4	5	6
$C_1$	0.71	0.87	0.61	0.71	0.90	0.65
$C_2$	0.75	0.81	0.68	0.88	0.65	0.64
$C_3$	0.82	1	0.57	0.59	0.93	1
$C_4$	0.91	0.73	0.71	0.60	0.83	0.81
$C_5$	0.67	0.81	0.91	0.65	0.73	0.78
$C_6$	0.69	0.84	0.67	1	0.66	0.71
$C_7$	0.59	0.68	0.75	0.65	0.87	0.83
$C_8$	0.76	0.72	0.66	0.66	0.59	0.91
$C_9$	0.61	0.59	0.71	0.91	0.68	0.62

方案3的 $C_3$ 为全局极小值,在能效评价中,为了对比熵值法与本论文中改进的熵值法对于极值的敏感程度,将 $C_3$ 的从0.57调整到更小的0.30,然后继续在调整到更小的0.10,来观察熵值法和改进熵值法对于更加小极值出现时的情况,评价结果如图3~4所示。

图3 熵值法  
Fig. 3 Entropy method图4 改进熵值法  
Fig. 4 Improved entropy method

根据对比结果图来看,在把全局极值变的更小的情况下,改进的熵值法在所有方案中除了方案3,另外的评价结果与之前的基本相同,变化不明显,而熵值法则在每个方案中都有明显波动。熵值法在极小值从0.58下降到0.3时,各个方案对的评价结果对极值的敏感度约为26%,继续下降极值从0.3到0.1时。敏感度约为30%。改进的熵值法对极值从0.58下降到0.3的敏感度仅为4%,对极值从0.3下降到0.1的敏感度仅为5%。这也说明了当测区的数据不是很准确的时候,熵值法的结果会出现客观性较低结果。但是改进的熵值法更够很好的克服这个问题,使评价结果更加的稳定。

## 5 结论

国内关于离散制造系统的能效评价方法相对较少,因此本文提出了一种基于改进的熵值法能效评价方法,它借层次分析法(AHM)的赋权思路,对熵值法进行了改进,将主观和客观更好的结合起来,从而既能客观的评价系统能效,又能在某指标的离散程度太大时,克服权重过大的这一问题,有助于企业进行更有针对性的优化。

## 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 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 89-97. (Wang Junfeng, Li Shiqi, Liu Jihong. A Survey on Energy Efficient Discrete Manufacturing System [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 89-97.)
- [2] 朱金环. 工程项目管理效果整体评价的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013. (Zhu Jinhuan. Study on Engineering Projects Management Effect Overall Evaluation [D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2013.)
- [3] 李娜娜,何正友. 组合赋权法在电能质量综合评估中的应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 23(16): 128-134. (Li Nana, He Zhengyou. Combinatorial weighting method for comprehensive evaluation of power quality [J]. Power System Protection & Control, 2009, 23(16): 128-134.)
- [4] 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 [J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(12): 12-16.



