

# 基于区间数的制造过程资源环境属性评价

岳文辉, 韩自强, 王晓俊

(湖南科技大学 机械设备健康维护省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:**针对制造过程资源环境属性的复杂性和多样性,考虑环境不确定性和测量误差等因素的影响,提出一种基于区间数的资源环境属性评价方法.利用该方法对 dCi11 发动机关键零部件制造过程资源环境属性进行评价,并对发动机关键零部件制造过程的绿色性进行排序,从而验证了该方法的可行性和实用性.

**关键词:**区间数;资源环境属性;评价;不确定性

**中图分类号:**TH162      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-9102(2013)03-0022-04

发动机是将化学能转化为机械能的一种动力装置,它是汽车的“心脏”,为汽车的运动提供动力.组成发动机的零件数以千计,而缸体、缸盖、连杆、凸轮轴、曲轴是最重要最关键的部件,他们的质量在很大程度上决定着发动机的性能.零部件的质量又与其加工工艺有关,零部件的加工工艺不同,其资源消耗特性和环境影响特性也不同.对发动机关键零部件加工工艺的资源环境属性进行分析和评价,能为制造企业从关键零部件着手改善发动机制造过程中的绿色性、采用绿色工艺提供理论依据,也对拓展绿色制造应用领域具有重要的意义.

随着全球环境问题的日益凸显和绿色制造理念的日趋普及,对产品生产过程资源环境属性评价的研究也引起了学者们的关注. Fijat<sup>[1]</sup>等学者对产品生产过程的能量流和物流进行了分析,并提出了针对选定的几种工艺方法的环境属性集成定量评价方法. Salonitis<sup>[2]</sup>等利用 LCA 方法对零件硬化磨削工艺的环境属性进行了定量评估,并提出了相应的替代工艺以改善环境的友好性. 张华<sup>[3]</sup>等建立了某刨削工艺清单分析表,综合评价该工艺的绿色性,从

而为改善其资源消耗和环境影响提供依据. 曹华军<sup>[4]</sup>等基于工艺 IPO 过程模型和列昂波特相互作用矩阵,提出一种零件制造过程能量和物料消耗、环境废物排放和安全性的评价方法. 王贤琳<sup>[5]</sup>等提出了基于 BP 神经网络的综合评价方法,建立了基于 BP 神经网络的评价模型;并使用 MATLAB 神经网络工具箱对模型进行模拟仿真. 江志刚<sup>[6]</sup>等开发了一种制造企业生产过程资源环境属性综合评价支持系统,通过在某机床厂齿轮生产过程中的应用,验证了该系统的可行性. 以上评价方法有一个共同的特点,即在进行资源环境属性评价时把评价指标看成一个定值. 而事实上,由于环境的不确定性<sup>[7]</sup>、主观思维的模糊性、测量的误差、客观事物的复杂多变性等原因,评价指标往往不是一个定值而是一个波动范围,通常用区间数来表示这个波动范围. 本文提出一种指标值为区间数的资源环境属性评价方法,并通过实例验证了此方法的可行性和实用性.

## 1 区间数及运算

在区间数学中,区间数定义如下:

收稿日期:2013-03-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51075142);国家科技支撑计划项目(2012BAF02B01);湖南省科技创新团队资助项目

通信作者:岳文辉(1965-),男,湖南邵阳人,博士,教授,主要从事绿色制造、多学科稳健优化设计及机械设备故障诊断等方面. E-mail:jwc1999178@126.com

$$a = [a^L, a^U].$$

式中:  $a$  称为区间数;  $a^U, a^L$  分别称为区间数  $a$  的上下界. 当  $a^L = a^U$  时, 区间退化为一个实数.

若  $a = [a^L, a^U], b = [b^L, b^U]$  为任意的 2 个区间数, 其四则运算法则如下<sup>[8]</sup>:

$$a + b = [a^L + b^L, a^U + b^U],$$

$$a - b = [a^L - b^U, a^U - b^L],$$

$$a \times b = [\min(a^L b^L, a^L b^U, a^U b^L, a^U b^U), \max(a^L b^L, a^L b^U, a^U b^L, a^U b^U)], a/b = [a^L, a^U] \times [1/b^U, 1/b^L],$$

为比较任意 2 个区间数的优劣或大小, 需要对区间数进行排序. 为此, 定义区间数相对优势度如下<sup>[9]</sup>.

设  $a = [a^L, a^U], b = [b^L, b^U], a^L, b^L > 0$ , 称  $a$  大于  $b$  的相对优势为

$$P(a \geq b) = \begin{cases} 0.45 + \frac{a^U \times a^L}{10(a^U \times a^L + b^U \times b^L)}, m_a = m_b; \\ 0.1 + 0.9 \times \min\left\{\frac{a^U - a^L}{l(a) + l(b)}, 1\right\}, m_a > m_b; \\ 0.9 \times \max\left\{\frac{a^U - a^L}{l(a) + l(b)}, 0\right\}, m_a < m_b. \end{cases} \quad (1)$$

式中  $m_a, m_b$  分别为区间数  $a, b$  的中心,  $l(a), l(b)$  分别为区间数  $a, b$  的长度.

## 2 区间数资源环境属性评价原理

假设有  $m$  个零件, 第  $i$  个零件记为  $L_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ; 每个零件有  $n$  个评价指标, 第  $j$  个评价指标记为  $E_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ; 其评价步骤如下:

### 2.1 建立指标区间数决策矩阵

根据评价指标值建立带有区间数形式的决策矩阵用  $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}$  表示, 其中  $a_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ ,  $a_{ij}$  表示第  $i$  个零件对应于第  $j$  个指标的区间数值, 即可以表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

### 2.2 区间数决策矩阵规范化

根据变化方向的不同, 指标大致可以分为 2 种类型, 即效益型指标和成本型指标. 效益型指标是指数值越大越好的指标, 成本型指标是指数值越小越好的指标. 由于各个指标数量级和量纲不同, 故要进行规范化. 规范化以后的矩阵用  $\mathbf{B} = (b_{ij})_{m \times n}$  表示, 其计算公式为<sup>[10]</sup>

$$\text{效益型指标, 则 } b_{ij}^L = \frac{a_{ij}^L}{a_j^{U_{\max}}}, b_{ij}^U = \frac{a_{ij}^U}{a_j^{L_{\max}}}. \quad (3)$$

$$\text{成本型指标, 则 } b_{ij}^L = \frac{a_j^{L_{\min}}}{a_{ij}^L}, b_{ij}^U = \frac{a_j^{U_{\min}}}{a_{ij}^U}. \quad (4)$$

由上式可得  $0 \leq b_{ij}^L \leq 1$ , 而  $b_{ij}^U$  有可能大于 1, 可以利用下面的变换把规范化矩阵  $\mathbf{B}$  进行再规范化, 再规范化矩阵用  $\mathbf{D} = (d_{ij})_{m \times n}$  表示,

$$d_{ij} = \frac{b_{ij}^L}{\max b_j^U} = [d_{ij}^L, d_{ij}^U]. \quad (5)$$

由上式易知  $d_{ij}^L, d_{ij}^U \in [0, 1]$ , 且  $d_{ij}^L < d_{ij}^U$ .

### 2.3 求出各个评价指标的权重

利用权重的求解方法求出评价指标的权重集  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ , 其中  $w_j \geq 0 (j = 1, 2, \dots, n)$ ,  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ .

### 2.4 求解各个零件的综合评价价值

根据多指标决策中的简单加权法和区间数学中的区间扩张原理, 则第  $i$  个零件的综合评价价值可表示为

$$c_i = \sum_{j=1}^n w_j d_{ij} = [c_i^L, c_i^U] \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

### 2.5 建立优势度矩阵

把所有零件的综合评价价值  $c_i = [c_i^L, c_i^U]$ , 进行两两比较, 建立优势度矩阵  $\mathbf{P} = (p_{ij})_{n \times n}$ .

$$\text{即: } \mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0.5 & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & 0.5 & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & 0.5 \end{bmatrix} \text{ 其中: } p_{ij} = P(c_i \geq c_j). \quad (7)$$

### 2.6 求出优势度矩阵的排序向量并进行排序

设优势度矩阵  $\mathbf{P}$  的排序向量是  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ , 且  $\sum_{i=1}^n v_i = 1$ ,

$$\text{则 } v_i = \frac{2 \times \left[ \sum_{j=1}^n p_{ij} + 0.5 \right]}{n(n+1)}. \quad (8)$$

按照计算出  $v_i$  的大小对相应的区间数  $c_i$  按从大到小的顺序排序, 区间数的  $c_i$  的大小顺序即代表方案绿色性的大小顺序.

## 3 发动机关键零部件制造过程资源环境属性评价

选取 dCi11 发动机的关键零部件为研究对象, 该发动机为直列六缸、四冲程、增压中冷柴油机. 每台 dCi11 发动机有连杆 6 个, 缸体、缸盖、曲轴、凸轮

轴各 1 个. 从现场采集的发动机关键零部件加工工 艺的资源环境评价指标值如表 1 所示.

表 1 每台 dCi11 发动机关键零部件制造过程资源环境属性评价指标值

Tab. 1 Key parts manufacturing process resource environment property evaluation index of dCi11 engine

零件名称	原材料消耗/kg	刀具消耗 /yuan	切削液消耗/L	电能消耗 / (kw · h)	固体废物 弃物/kg	废液排放 /L	噪声 /dB
缸体	[23.8,30.4]	[269.6,295.5]	[4.11,5.95]	[74.24,85.17]	[22.1,28.8]	[4.11,5.95]	[80,95]
缸盖	[27.8,37.9]	[275.8,308.6]	[4.29,5.84]	[78.35,83.28]	[26.3,35.6]	[4.29,5.84]	[75,90]
曲轴	[8.8,12.2]	[163.2,175.9]	[2.79,3.93]	[52.16,62.12]	[7.5,10.3]	[2.79,3.93]	[65,85]
连杆	[2.5,3.6]	[73.1,83.3]	[3.02,4.13]	[51.25,65.08]	[2.3,3.1]	[3.02,4.13]	[50,75]
凸轮轴	[4.7,7.7]	[94.6,103.5]	[2.66,3.87]	[48.56,57.46]	[4.1,6.9]	[2.66,3.87]	[70,85]

根据表 1 中的数据建立区间数决策矩阵  $A$

$$A = \begin{bmatrix} [23.8,30.4] & [269.6,295.5] & [4.11,5.95] & [74.24,85.17] & [22.1,28.8] & [4.11,5.95] & [80,95] \\ [27.8,37.9] & [275.8,308.6] & [4.29,5.84] & [78.35,83.28] & [26.3,35.6] & [4.29,5.84] & [75,90] \\ [8.8,12.2] & [163.2,175.9] & [2.79,3.93] & [52.16,62.12] & [7.5,10.3] & [2.79,3.93] & [65,85] \\ [2.5,3.6] & [73.1,83.3] & [3.02,4.13] & [51.25,65.08] & [2.3,3.1] & [3.02,4.13] & [50,75] \\ [4.7,7.7] & [94.6,103.5] & [2.66,3.87] & [48.56,57.46] & [4.1,6.9] & [2.66,3.87] & [70,85] \end{bmatrix}$$

以上 7 个指标都为成本型指标,由公式(4)将区间数矩阵规范化得到规范化矩阵  $B$

$$B = \begin{bmatrix} [0.08,0.15] & [0.25,0.31] & [0.45,0.94] & [0.57,0.77] & [0.08,0.14] & [0.45,0.94] & [0.53,0.94] \\ [0.07,0.13] & [0.24,0.30] & [0.46,0.90] & [0.58,0.73] & [0.06,0.12] & [0.46,0.90] & [0.56,1.00] \\ [0.20,0.41] & [0.42,0.51] & [0.68,1.39] & [0.78,1.10] & [0.22,0.41] & [0.68,1.39] & [0.59,1.15] \\ [0.69,1.44] & [0.88,1.14] & [0.64,1.28] & [0.75,1.12] & [0.74,1.35] & [0.64,1.28] & [0.67,1.50] \\ [0.32,0.77] & [0.71,0.88] & [0.69,1.45] & [0.85,1.18] & [0.33,0.76] & [0.69,1.45] & [0.59,1.07] \end{bmatrix}$$

将规范化矩阵  $B$  进行再规范化得到矩阵  $D$

$$D = \begin{bmatrix} [0.06,0.10] & [0.22,0.27] & [0.31,0.65] & [0.48,0.65] & [0.06,0.10] & [0.31,0.65] & [0.35,0.63] \\ [0.05,0.09] & [0.21,0.26] & [0.32,0.62] & [0.49,0.62] & [0.04,0.09] & [0.32,0.62] & [0.37,0.67] \\ [0.14,0.28] & [0.37,0.45] & [0.47,0.96] & [0.66,0.93] & [0.16,0.30] & [0.47,0.96] & [0.39,0.77] \\ [0.48,1.00] & [0.77,1.00] & [0.44,0.88] & [0.64,0.95] & [0.55,1.00] & [0.44,0.88] & [0.45,1.00] \\ [0.22,0.53] & [0.62,0.77] & [0.48,1.00] & [0.72,1.00] & [0.24,0.56] & [0.48,1.00] & [0.39,0.71] \end{bmatrix}$$

利用层次分析法<sup>[11]</sup> 求出评价指标的权重集  $W$

$$W = (0.2887 \ 0.1705 \ 0.1705 \ 0.1705 \ 0.0980 \ 0.0612 \ 0.0406)^T$$

由公式(6) 可得各个零件的综合评价价值

$$c_1 = [0.2286,0.3717], c_2 = [0.2269,0.3557], \\ c_3 = [0.3564,0.5992], c_4 = [0.5531,0.9637], \\ c_5 = [0.4426,0.7702].$$

把 5 个零件的综合指标值进行两两比较可以建立优势度矩阵  $P$

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.574 & 0.334 & 0.233 & 0.274 \\ 0.426 & 0.5 & 0.312 & 0.215 & 0.254 \\ 0.666 & 0.688 & 0.5 & 0.334 & 0.383 \\ 0.767 & 0.785 & 0.666 & 0.5 & 0.601 \\ 0.726 & 0.746 & 0.617 & 0.399 & 0.5 \end{bmatrix}$$

由公式(8) 可求出优势度矩阵的排序向量  $V$

$$V = (0.1610 \ 0.1471 \ 0.2047 \ 0.2546 \ 0.2325)^T.$$

根据计算出  $v_i$  的大小对相应的区间数  $c_i$  按从大到小的顺序排序,由于  $c_i$  的大小顺序即代表零件制造过程绿色性的大小顺序,故 dCi11 发动机连杆制造过程的绿色性最好,而缸盖制造过程的绿色性最差. 其关键零部件制造过程绿色性从好到差的顺序为:连杆、凸轮轴、曲轴、缸体、缸盖.

## 4 结论

在进行资源环境属性评价时为了考虑环境不确定性和测量误差等因素的影响,提出一种区间数资源环境属性评价方法. 并利用此方法对 dCi11 发动机关键零部件制造过程资源环境属性进行评价,证明了该评价方法的可行性和实用性. 本文将区间数知识运用到资源环境属性评价中,为企业采用绿色工艺提供了理论依据,具有重要的实用价值.

## 参考文献:

- [1] Fijat T. An environmental assessment method for cleaner production technologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15: 914 – 919.
- [2] Salonitis K, Tsouk G, Drakopoulos S, et al. Environmental impact assessment of grind – hardening process 13th CIRP International Conferences on Life Cycle Engineering [C]. Leuven, Belgium; International Institution for Production Engineering Research CIRP, 2006:657 – 662.
- [3] 张华, 李明珠, 王艳红, 等. 机械加工工艺过程资源环境属性清单分析与评价[J]. *机械与电子*, 2011(2):11 – 14.  
Zhang H, Li M Z, Wang Y H, et al. Resource and environmental attribution inventory analysis and evaluation of machining technical process [J]. *Machinery & Electronics*, 2011 (2):11 – 14.
- [4] 曹华军, 刘飞, 阎春平. 制造过程环境影响评价方法及其应用[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6):163 – 167.  
Cao H J, Liu F, Yan C P. Environmental impact evaluation method of manufacturing processes and its case [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6):163 – 167.
- [5] 王贤琳, 张华, 宋佳佳. 基于 BP 神经网络的制造过程环境影响评价模型[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(16):1942 – 1946.  
Wang X L, Zhang H, Song J J. Environmental impact evaluation model of manufacturing processes based on BP neural network [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(16):1942 – 1946.
- [6] 江志刚, 张华, 傅成, 等. 生产过程资源环境属性综合评价支持系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(7):1323 – 1327.  
Jiang Z G, Zhang H, Fu C, et al. Comprehensive assessment system for resource and environmental attribution in production process [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(7):1323 – 1327.
- [7] 张清平, 阳彩霞, 万中. 固废管理问题的区间模糊优化模型[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 27(2):125 – 128.  
Zhang Q P, Yang C X, Wan Z. A hybrid interval – parameter fuzzy optimization model for solid waste management problem [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology ( Natural Science Edition)*, 2012, 27(2):125 – 128.
- [8] 朱增青, 陈建军, 梁震涛. 基于可信度约束结构分析的区间因子法[J]. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 23(2):36 – 40.  
Zhu Z Q, Chen J J, Liang Z T. Interval factor method with faith degree constraint for structural analysis [J]. *Journal of Hunan University of Science & Technology ( Natural Science Edition)*, 2008, 23(2):36 – 40.
- [9] 李政文. 区间数不确定多属性决策方法研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2010.  
Li Z W. Study on methods for multiple attribute decision making under interval uncertainty [D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [10] 张益, 张俊容. 区间多属性决策的一种新方法[J]. *统计与决策*, 2007(4):124 – 125.  
Zhang Y, Zhang J R. A new method about interval multi – attribute decision – making [J]. *Statistics & Decision*, 2007(4):124 – 125.
- [11] 马改焕, 蔡康旭, 刘芳, 等. 基于 AHP – Fuzzy 模型的矿工不安全心理分析[J]. *矿业工程研究*, 2012, 27(4):50 – 54.  
Ma G H, Cai K X, Liu F, et al. Analysis of miner’s insecure mental state based on AHP – Fuzzy model [J]. *Mineral Engineering Research*, 2012, 27(4):50 – 54.

# Resource and environmental attributions evaluation in manufacturing process based on interval number

YUE Wen – hui, HAN Zi – qiang, WANG Xiao – jun  
(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** For the complexity and diversity of resource and environmental attributions in manufacturing process, a resource and environmental attributions evaluation method based on interval number is put forward. Also, the method considered the effect of the environmental uncertainty and measurement error. The method was used in the resource and environmental attributions evaluation of the key parts of dCi11 engine in manufacturing process, which found the green merit order of key parts in the engine manufacturing process. And the feasibility and practicality of the method was attested.

**Key words:** interval number; resource and environmental attributions; evaluation; uncertainty