

# 工业产品绿色设计的三维模糊评价模型

谢家平 陈荣秋

(华中科技大学管理学院)

**摘要:** 为了解决产品生命周期各阶段在众多因素影响下的系统评价问题,论述了绿色产品的评价指标体系;运用关联分析计算权重,对评价样本值矩阵进行了设计;运用模糊评价原理,对产品的绿色度进行综合评价。评价方法的客观性强,便于操作,有利于寻找尚需改进的指标、生命周期阶段和产品组成部件,提升其绿色含量。

**关键词:** 工业产品;绿色设计;评价指标体系;评价模型;模糊评价

**中图分类号:** F406 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4512(2003)06-0109-04

如何测算和评估产品及其制造设计方案的绿色性是一个十分复杂的问题,需要进行综合分析 with 评估。虽然文献[1,2]运用层次分析法或模糊评价原理对产品的绿色性进行了量化分析,但没有将产品生命周期过程结合起来考虑。实际上,同一指标在不同生命周期阶段的衡量标准的差异性很大,只是笼统地评估产品的绿色性,客观性、科学性不强,可操作性差;文献[3,4]考虑了产品的生命周期,但文献[3]对量化的方法未做探讨,文献[4]对综合评价模型研究不够。因此,本研究运用模糊综合评价原理,建立量化产品绿色度的系统评价模型。

## 1 绿色设计评价指标集、标准集及指标权重集

产品设计目标  $O$  的实现程度需要用不同的评价指标来度量。绿色设计的评价指标包含的因素很多,既要考虑产品设计方案的性能属性指标  $U_1$  和经济属性指标  $U_2$ ,同时也要兼顾生产、使用、回收处理的环境属性  $U_3$ ,资源属性  $U_4$  和能源属性  $U_5$  等指标。既有定性指标,又有定量指标,且指标体系具有明显的多层次性特点。其中,性能属性指标  $U_1$  包括功能指标  $V_{11}$ ,质量指标  $V_{12}$ ,品种多样性指标  $V_{13}$ ,交货及时性指标  $V_{14}$ ,操作安全性指标  $V_{15}$ ,维护简便性指标  $V_{16}$  等。经济属性指标  $U_2$  包括企业成本  $V_{21}$  (设计成本、制造成本、储运成本、售后服务成本等),用户成本

$V_{22}$  (运行费用、维护费用等),生态环境成本  $V_{23}$  (污染治理费、污染排放费、报废处理费等)。环境属性指标  $U_3$  包括水污染指标  $V_{31}$ ,大气污染指标  $V_{32}$ ,废弃物污染指标  $V_{33}$ ,噪声污染指标  $V_{34}$  等。资源属性指标  $U_4$  包括材料种类  $V_{41}$ ,单位产品资源消耗量  $V_{42}$ ,设备工具消耗指标  $V_{43}$ ,资源利用率  $V_{44}$ ,废弃资源回收率  $V_{45}$ ,资源可再生性指标  $V_{46}$ ,材料易降解性指标  $V_{47}$ ,材料有毒有害性指标  $V_{48}$  等。能源属性指标  $U_5$  包括能源种类  $V_{51}$ ,能源消耗量  $V_{52}$  (材料生产过程的能耗、产品加工过程的能耗、产品使用过程的能耗、回收处理过程的能耗),消耗能源的可再生性指标  $V_{53}$ ,是否是清洁能源  $V_{54}$  等。将评价指标按属性归类,分层排列成具有层次结构的指标体系。设大类属性指标  $U_i$  有  $m$  项 ( $i=1, 2, \dots, m$ ),第  $i$  大类指标下又设置了  $n_i$  个次级指标  $V_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, n_i$ )。

为了度量设计产品的绿色度,体现评价的公正合理性,以便对设计方案进行综合评价,确定各设计方案的绿色环保性次序,对于每一个评价指标都应设立其衡量的标准值,它们的集合组成绿色设计的评价标准集。由于人们对绿色设计的研究还不深,缺乏统一的认识,因此尚未制定具体、统一、系统的评价标准。从目前情况来看,评价标准可以采用国家环境保护标准,部门和行业制定的产品标准,以及地方法规的规定,这些标准具有指导性、强制性特点,是绝对性标准。对于没有规

收稿日期: 2002-11-20.

作者简介: 谢家平(1963-),男,博士研究生;武汉,华中科技大学管理学院(430074).

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(79870073).

定评价标准的指标,可以根据用户的需求,结合市场竞争状况和技术进步,与现有产品及相关技术进行比较来确定,或者根据统计数据确定,这种标准是相对比较性标准。

为便于综合不同的指标值,还需定义评价标准的类别  $l$ , 如  $l = (1, 2, \dots, 5)$ . 就定量指标  $V_{ij}$  而言, 可以将数据按相关规定确定的阈值  $C_{ij}^1, C_{ij}^2, \dots$  分类归级. 例如, 根据我国 1996 年颁布的环境空气质量标准,  $SO_2$  日均排放的分级值为:  $0.05 \text{ mg/m}^3$  (一级),  $0.15 \text{ mg/m}^3$  (二级),  $0.25 \text{ mg/m}^3$  (三级); 其分类阈值分别是  $C_{SO_2}^1 = 0.05, C_{SO_2}^2 = 0.15, C_{SO_2}^3 = 0.25$ . 就定性指标  $V_{ij}$  而言, 对评价标准有不同的描述方式, 如取最差、较差、一般、较好、最好 5 级, 不同等级的评价标准值用数字来度量, 如取 1, 3, 5, 7, 9, 分别表示这 5 级的评价标准值, 则阈值  $C_{ij} = (1, 3, 5, 7, 9)$ .

对于指标权重的确定, 人们通常采用层次分析原理, 但这种方法的客观性不强: 一是将定量指标主观化处理, 仿照定性指标建立判断矩阵; 二是判断矩阵的建立因人而异, 随意性强. 因此, 本研究根据关联分析原理, 用关联度来定义权重<sup>[5]</sup>.

通过关联度分析, 可以计算出  $m$  类指标  $U$  的权重向量  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ . 同理, 若第  $i$  大类指标下设置  $n_i$  个次级指标  $V_{ij}$ , 则可以计算各指标  $V_{ij}$  相对于  $U_i$  的相对权重向量  $\omega_i = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in_i})$ .

## 2 绿色设计的评价值矩阵

绿色设计的目标是设计出环境友好的绿色产品, 它是指资源消耗少, 在生产、使用和报废处理过程中对环境污染小, 便于回收和再利用的产品. 在文献[3]论述的基础上, 考虑绿色设计的三维评价结构体系如图 1 所示.

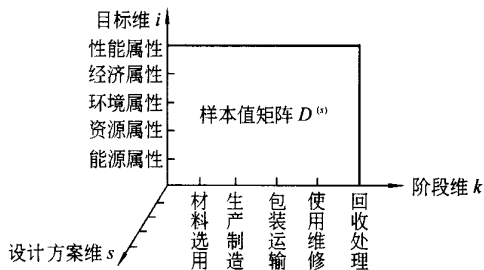


图 1 绿色设计的三维评价体系结构

a. 阶段维  $k$ . 考虑产品材料选用、生产制造、包装运输、使用维修和回收处理等 5 个时间段, 即从摇篮到再现的产品生命周期全过程, 尽可能将

整个生命周期各阶段的资源和能源消耗及对环境的影响在产品设计的虚拟过程中并行地解决, 设阶段权重向量  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5)$ .

b. 目标维 (指标维)  $i$ . 绿色设计方案要满足基本目标、绿色目标和安全目标的要求, 可以通过性能属性、经济属性、环境属性、资源属性、能源属性等一系列指标来度量.

c. 设计方案维  $s$ . 视评价目的而定, 对于方案择优, 它是具有相同功能的不同设计方案; 对于方案改进, 它可以是组成产品的材料、零件、部件、产品等层级 (通过分析评估, 明确需要改进的部分).

将指标维分类按行排列, 共有  $N = n_i$  行; 将阶段维按列排列, 共有 5 列, 其序号  $k = 1, 2, \dots, 5$ . 考虑设计方案  $s$ , 对于评价指标  $V_{ij}$ , 设产品生命周期第  $k$  阶段的评价值为  $d_{ij}^{(s)k}$ , 则有一个评价向量  $d_{ij}^{(s)} = (d_{ij}^{(s)1}, d_{ij}^{(s)2}, \dots, d_{ij}^{(s)5})$ . 所有指标的评价向量可组成方案  $s$  的评价样本值矩阵

$$D^{(s)} = [d_{ij}^{(s)k}]_{N \times 5}$$

## 3 绿色设计的三维层次模糊综合评估模型

本研究运用模糊评估原理, 考虑指标维、阶段维、设计方案维, 构建一个三维层次的模糊综合评估模型<sup>[6]</sup>, 对所设计产品的绿色性进行综合分析研究. 模糊评价的因素集就是以上论述的评价指标集; 评语集是一些描述性的评价等级语言, 如“最差, 较差, 一般, 较好, 最好”, 则  $e = (1, 2, \dots, 5)$ .

### 3.1 建立隶属度函数

考虑 5 个评价等级, 评价指标  $V_{ij}$  的隶属度函数  $\mu_{ijl}(d_{ij})$  如图 2 所示, 下标  $l$  指隶属类别.

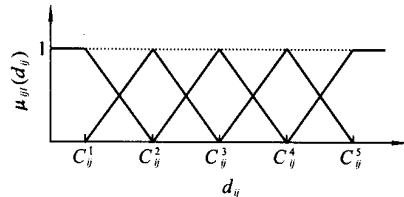


图 2 评价指标  $V_{ij}$  的隶属度函数

a. 指标  $V_{ij}$  的阈值为  $C_{ij}^1 (l = 1)$ ,

$$\mu_{ij1}(d_{ij}) = \begin{cases} 1 & (d_{ij} < C_{ij}^1); \\ (C_{ij}^2 - d_{ij}) / (C_{ij}^2 - C_{ij}^1) & (C_{ij}^1 < d_{ij} < C_{ij}^2); \\ 0 & (d_{ij} > C_{ij}^2). \end{cases}$$

b. 指标  $V_{ij}$  的阈值为  $C_{ij}^l (l = 2, 3, 4)$ ,

$$\mu_{ijl}(d_{ij}) = \begin{cases} (d_{ij} - C_{ij}^{l-1}) / (C_{ij}^l - C_{ij}^{l-1}) & (C_{ij}^{l-1} < d_{ij} < C_{ij}^l); \\ (C_{ij}^{l+1} - d_{ij}) / (C_{ij}^{l+1} - C_{ij}^l) & (C_{ij}^l < d_{ij} < C_{ij}^{l+1}); \\ 0 & (d_{ij} \notin (C_{ij}^{l-1}, C_{ij}^{l+1})). \end{cases}$$

c. 指标  $V_{ij}$  的阈值为  $C_{ij}^5 (l=5)$ ,

$$\mu_{ij5}(d_{ij}) = \begin{cases} 1 & (d_{ij} < C_{ij}^5); \\ (d_{ij} - C_{ij}^4) / (C_{ij}^5 - C_{ij}^4) & (C_{ij}^4 < d_{ij} < C_{ij}^5); \\ 0 & (d_{ij} > C_{ij}^4). \end{cases}$$

### 3.2 评语等级的模糊映射

考虑评价标准与评价等级  $e$  之间的对应配合关系. 根据评价标准, 对于定性指标, 量化的评价价值越大越好, 评语等级的次序与评价标准次序一致, 只需顺序对应; 但对于定量指标, 有的希望越大越好, 有的则希望越小越好, 这就需要将它们的隶属类别映射到相应的评语等级, 即  $\mu_{ijl}(d_{ij}) \Leftrightarrow f_{ije}(d_{ij})$ . 希望指标越大越好, 则  $f_{ij1}(d_{ij}) = \mu_{ij1}(d_{ij}), f_{ij2}(d_{ij}) = \mu_{ij2}(d_{ij}), \dots, f_{ij5}(d_{ij}) = \mu_{ij5}(d_{ij})$ ; 希望指标越小越好, 则  $f_{ij1}(d_{ij}) = \mu_{ij5}(d_{ij}), f_{ij2}(d_{ij}) = \mu_{ij4}(d_{ij}), f_{ij3}(d_{ij}) = \mu_{ij3}(d_{ij}), f_{ij4}(d_{ij}) = \mu_{ij2}(d_{ij}), f_{ij5}(d_{ij}) = \mu_{ij1}(d_{ij})$ .

### 3.3 指标维综合评价

a. 进行单指标分析, 计算指标  $V_{ij}$  的隶属度向量. 对于指标  $V_{ij}$ , 根据隶属函数  $f_{ije}(d_{ij})$  和评价价值  $d_{ij}^{(s)k}$ , 计算方案  $s$  隶属于等级  $e$  的评价系数

$$r_{ije}^{(s)k} = f_{ije}(d_{ij}^{(s)k}),$$

进行归一化处理, 得其隶属度

$$r_{ije}^{(s)} = \frac{r_{ije}^{(s)k}}{\sum_l r_{ijl}^{(s)k}}.$$

同理, 综合得方案  $s$  对于指标  $V_{ij}$  的隶属度向量  $R_{V_{ij}}^{(s)} = (r_{ij1}^{(s)}, r_{ij2}^{(s)}, \dots, r_{ij5}^{(s)})$ . 综合  $U_i$  大类指标所属二级指标  $V_{ij}$  的隶属度向量, 得  $U_i$  指标的隶属度矩阵

$$R_{U_i}^{(s)} = \begin{pmatrix} r_{i11}^{(s)} & r_{i12}^{(s)} & \dots & r_{i15}^{(s)} \\ r_{i21}^{(s)} & r_{i22}^{(s)} & \dots & r_{i25}^{(s)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{in_1}^{(s)} & r_{in_2}^{(s)} & \dots & r_{in_5}^{(s)} \end{pmatrix}.$$

b. 进行大类指标的评价. 将  $U_i$  所属二级指标的权重向量  $w_i$  与其隶属度矩阵相乘, 有

$$R_{U_i}^{(s)} w_i = (r_{i1}^{(s)}, r_{i2}^{(s)}, \dots, r_{i5}^{(s)}).$$

c. 进行方案  $s$  的综合评价. 综合各大类指标

的模糊评价结果  $R_{U_i}^{(s)}$ , 得方案  $s$  的模糊矩阵

$$R_U^{(s)} = [r_{ie}^{(s)}]_{m \times s}.$$

用大类指标的权重向量  $w$  进行综合权衡, 综合评价结果为

$$B^{(s)} = R_U^{(s)} w = (b_1^{(s)}, b_2^{(s)}, \dots, b_5^{(s)}).$$

d. 确定评价结果. 根据  $R_{U_i}^{(s)}$  和  $B^{(s)}$ , 按最大接近度原则确定评价等级. 根据各指标所属评价等级, 可明确方案  $s$  的差距所在. 或者, 根据评价等级值, 如取  $W = (1, 3, 5, 7, 9)$ , 对  $R_{U_i}^{(s)}$  和  $B^{(s)}$  作单值化处理, 得综合评价价值  $W_i^{(s)} = R_{U_i}^{(s)} W^T$ ;  $W^{(s)} = B^{(s)} W^T$ , 通过比较可得各方案的优劣次序.

### 3.4 阶段维综合评价

a. 计算各阶段  $k$  的隶属度向量. 对于方案  $s$ , 根据隶属函数  $f_{ije}(d_{ij})$  和评价价值  $d_{ij}^{(s)k}$ , 计算第  $k$  阶段第  $V_{ij}$  指标隶属于等级  $e$  的评价系数  $r_{ije}^{(s)k}$ , 即  $r_{ije}^{(s)k} = f_{ije}(d_{ij}^{(s)k})$ . 进行归一化处理, 得其隶属度  $r_{ije}^{(s)k}$ , 则阶段  $k$  指标  $V_{ij}$  的隶属度向量为

$$R_{V_{ij}}^{(s)k} = (r_{ij1}^{(s)k}, r_{ij2}^{(s)k}, \dots, r_{ij5}^{(s)k}).$$

b. 进行大类指标  $U_i$  的综合. 综合方案  $s$  阶段  $k$  指标  $U_i$  下所属  $n_i$  个次级指标  $V_{ij}$  的隶属度向量  $R_{V_{ij}}^{(s)k}$ , 得指标  $U_i$  的模糊矩阵

$$R_{U_i}^{(s)k} = \begin{pmatrix} r_{i11}^{(s)k} & r_{i12}^{(s)k} & \dots & r_{i15}^{(s)k} \\ r_{i21}^{(s)k} & r_{i22}^{(s)k} & \dots & r_{i25}^{(s)k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{in_1}^{(s)k} & r_{in_2}^{(s)k} & \dots & r_{in_5}^{(s)k} \end{pmatrix},$$

用  $U_i$  所属次级指标的权重向量  $w_i$  与  $R_{V_{ij}}^{(s)k}$  相乘, 得方案  $s$  阶段  $k$  指标  $U_i$  的模糊向量

$$R_{U_i}^{(s)k} w_i = (r_{i1}^{(s)k}, r_{i2}^{(s)k}, \dots, r_{i5}^{(s)k}).$$

c. 进行阶段  $k$  的综合. 综合方案  $s$  阶段  $k$  指标  $U_i$  的模糊向量  $R_{U_i}^{(s)k}$ , 得阶段  $k$  的模糊矩阵

$$R_U^{(s)k} = [r_{ie}^{(s)k}]_{m \times s}.$$

用指标  $U_i$  的权重向量  $w$  与  $R_U^{(s)k}$  相乘, 得方案  $s$  阶段  $k$  的评价向量

$$B^{(s)k} = R_U^{(s)k} w = (b_1^{(s)k}, b_2^{(s)k}, \dots, b_5^{(s)k}).$$

d. 确定评价结果. 根据  $B^{(s)k}$ , 按最大接近度原则确定方案  $s$  阶段  $k$  所属评价等级, 可以明确方案  $s$  的优势和差距主要出现在哪些阶段. 再追踪求源, 根据阶段  $k$  指标  $U_i$  和  $V_{ij}$  的隶属度向量  $R_{U_i}^{(s)k}$  和  $R_{V_{ij}}^{(s)k}$ , 按最大接近度原则划分评价等级, 还可以进一步确定是哪些阶段哪些指标存在问题.

## 参 考 文 献

- [1] 刘 飞,张 华,陈晓慧. 绿色制造的决策框架模型及其应用. 机械工程学报, 1999(5): 11~15
- [2] 王跃进,孟宪颐. 绿色产品多级模糊评价方法的研究. 中国机械工程, 2000(9): 1 016~1 020
- [3] 刘光复,刘志峰. 绿色产品及其评价系统框架. 机械设

- 计与研究, 1997(4): 12~14
- [4] 刘红旗,陈世兴. 产品绿色度的综合评价模型和方法体系. 中国机械工程, 2000(9): 1 013~1 014
- [5] 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉:华中理工大学出版社, 1988.
- [6] 谢家平,崔南方,陈荣秋等. ERP软件选型的模糊评估模型及其应用. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 37~40

## A model of three dimensions fuzzy evaluation for green design of industrial products

Xie Jiaping Chen Rongqiu

**Abstract:** An indices system for estimation was stated and their weights were calculated by relevant analysis. A matrix of estimation swatch values was redesigned. Fuzzy estimation principle was employed to make synthetical estimation for the green attributes of products. This estimation model is objective and practical. It is easy to find the indices, periods or components to be improved in order to increase green attributes.

**Key words:** industrial products; green design; indices system for estimation; evaluation model; fuzzy evaluation

**Xie Jiaping** Doctoral Candidate; College of Management, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.

(上接第99页) 再将  $\tau = 0.522 \mu\text{s}$  代入式(5), 可得第二种工作条件下超声散射场纵向自相关长度的理论计算值  $L_{LF} = 2c\tau = 1.55 \text{ mm}$ , 而根据 1 000 个实测数据所得的超声散射场纵向自相关长度的测量值是  $L_{LF} = (1.39 \pm 0.50) \text{ mm}$ .

## 参 考 文 献

- [1] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns. In: Daity J C ed. Laser Speckle and Related Phenomena. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 9~75
- [2] 伍小平,何世平,李志超. 空间散斑运动规律. 物理学

- 报, 1980, 29(9): 1 142~1 150
- [3] 秦玉文,戴嘉彬,陈金龙. 电子散斑方法的进展. 实验力学, 1996, 11(4): 410~416
- [4] Hong Z K, Han J B. Consideration on speckle pattern interferometry of ultrasonic speckles. Ultrasonics, 1997, 35(4): 329~332
- [5] 朱鸿茂,刘永辉,胡鹏等. 界面反射超声散斑统计特性. 声学学报, 2002, 27(3): 213~217
- [6] Goodman J W. Introduction to Fourier optics. New York: McGraw-Hill, 1968. 35~36
- [7] 陈自强,陈立功,倪纯珍等. 随机粗糙表面超声双透射研究. 声学学报, 2000, 25(6): 542~546

## Longitudinal properties of auto-correlation function of scattering ultrasound field from a rough surface

Hu Peng Liu Yonghui Zhu Cheng

**Abstract:** The longitudinal auto-correlation function of the scattering ultrasound field from a rough surface was studied theoretically and experimentally. The theoretical analyses show that the length of longitudinal auto-correlation function is related to the spacial coherence of the scattering ultrasound field and depends on the sound velocity and the pulse duration of the ultrasound incident on the interface. To verify this theoretical conclusion, an experiment was conducted. The experimental result is in good agreement with the theoretical one.

**Key words:** ultrasound; scattering field; auto-correlation function

**Hu Peng** Engineer; College of Civil Eng. & Mechanics, Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.