

基于模糊 AHP-TOPSIS 的环境意识设计方案相对绿色度研究

陈建, 张胜良, 李鑫, 陈琨

浙江工业大学; 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014

摘要 针对机械产品环境意识设计方案评价中评价指标值具有模糊性、指标权重具有不完全性的问题, 提出基于模糊 AHP-TOPSIS 的环境意识设计机械产品相对绿色度综合评价方法。为充分结合两者的优点, 先运用模糊 AHP 将各指标因素划分成有序层次, 科学确定各层次权重, 再结合模糊 TOPSIS 构建模糊 AHP-TOPSIS 综合评判模型, 根据有限个成本型和效益型定性定量指标与理想化目标的接近程度进行排序确定最优方案。该方法严格区分了效益型和成本型定性指标、效益型和成本型定量指标, 构建完善了基于全生命周期的环境意识设计机械产品指标评价的原则与体系。通过实例分析, 表明该评价方法在理论上具有科学性, 在实践中具有可操作性。

关键词 模糊层次分析法; 模糊 AHP-TOPSIS; 环境意识机械设计; 绿色设计; 绿色度

日益严峻的资源短缺和生态恶化是 21 世纪人类面临的主要问题之一。能源的短缺将直接影响各国经济的可持续发展, 过度开发与浪费则更加剧了这一趋势; 环境污染(比如大气污染、水污染等)则直接威胁着人类的健康和生存, 而且环境污染正朝着严重化、全局化、多样化方向发展。人类亟需一种方法根治资源、环境问题, 使之与工业化和谐共存^[1,2]。在经济全球化的浪潮中, 绿色壁垒问题在国际贸易中愈发突出, 由于各国的绿色标准不统一以及对绿色标准理解的差异, 造成了贸易成本增加、发达国家借此保护本国企业等诸多问题, 不利于全球经济一体化, 中国的机械产品深受此影响^[3-5]。但另一方面, 随着环境保护相关法律法规的完善与建立、企业社会责任意识的增强和人类对自身发展的反思, 环境意识机械设计应运而生, 成为解决上述问题的战略思路和推动经济社会可持续发展的重要途径。

环境意识机械设计强调从产品全生命周期的角度降低其对人与环境的影响, 是技术先进性、环境友好性和经济性等各方面的有机结合^[6,7]。作为产品改进和优化的依据, 对环境意识设计机械产品的绿色程度进行综合分析和评价是环境意识设计的重要一环。而由于机械行业所涉及的领域广泛, 产品复杂多样, 不同行业的人对绿色产品的认识不同。虽然绿色产品概念提出已有 20 多年的历史, 但到目前为止还未形成一个公认的、权威的定义, 由此造成绿色产品评价体系“百家争鸣, 百花齐放”的局面, 这在一定程度上阻碍了绿色机械产品的设计与开发。所以, 对绿色机械产品进行全面

正确地评价, 对于环境意识机械设计具有重要意义, 也是目前亟待解决的重点和难点问题^[8]。

绿色产品的评价是一个多层次、多因素的综合评价问题, 国内外学者就对绿色产品进行全面正确地评价这一问题进行了大量相关研究, 提出了许多具有理论和实践意义的评价指标体系和评价方法。绿色产品评价方法研究和应用最多的就是 LCA (Life Cycle Assessment, 生命周期评价)^[9-12], LCA 是一种用于评价产品或工艺从原材料采集到产品设计生产、流通、使用、回收整个生命周期阶段有关环境负荷过程的工具, 注重于研究产品系统在生态健康、人类健康和资源消耗领域内的影响。它首先辨识和量化能量和物质的利用以及由此造成的环境排放物, 然后评估其对环境的影响, 最后寻求改善环境影响的机会以及如何合理利用这种机会^[13,14]。LCA 虽然广泛应用于产品环境性能评价, 但评价的主观性、大量数据导致评价完整性和精度问题、研究内容不够全面、花费时间长成本高、国内外数据库标准不统一等造成通用性差。AHP (Analytic Hierarchy Process, 层次分析法) 作为一种重要的定性和定量分析相结合的解决多准则决策问题的方法也经常应用于绿色产品评价中, 凭借其简便、灵活而又实用的特点得到了广泛研究^[8,15-17], 但绿色产品评价指标包括定性和定量指标, 而两者又有成本型和效益型之分, 但传统层次分析法没有综合考虑成本型及效益型定性定量指标, 影响了评价结果的可靠性与客观性^[18]。TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, 逼近理想解

收稿日期: 2015-08-04; 修回日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175473); 浙江省自然科学基金项目(LY15E050021); 浙江省教育厅科研项目(Y201122752)

作者简介: 陈建, 副教授, 研究方向为绿色设计及制造、机器人等, 电子邮箱: chenjian@zjut.edu.cn

引用格式: 陈建, 张胜良, 李鑫, 等. 基于模糊 AHP-TOPSIS 的环境意识设计方案相对绿色度研究[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 304-313; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.043

排序法)能够根据有限个成本型及效益型定性定量指标与理想化目标的接近程度进行排序,从而减少评价结果因评价者及其偏好的不同而不同、因评价者及其偏好改变而改变的可能性^[19,20],但是其不足就是决策矩阵和指标权重向量需要事先给出。另外,诸如遗传算法、神经网络方法、数据包络分析法、模糊评价法、灰色评价方法、可拓评价方法^[21]、基于泛逻辑推理的评价方法^[22]等各有优缺点,但都没有系统解决环境意识设计评价体系中带有效益型及成本型定性指标、效益型及成本型定量指标的产品绿色度问题。

根据国内外研究成果,首先建立完善科学的绿色评价原则和体系,然后根据此原则和体系提出了基于模糊AHP-TOPSIS的环境意识设计机械产品相对绿色度综合评价方法,研究具有成本型及效益型定性及定量指标的绿色评价体系,建立具体规范的评价步骤,最后通过实例详细阐述此方法的过程,验证其可行性和有效性。

1 绿色评价原则与体系

对产品或方案进行绿色评价具有重要意义,可减少产品对环境的影响,提高企业的形象并增强其市场竞争力,帮助企业应对环保法律法规^[23]。

1.1 绿色评价原则

环境意识机械设计是一种现代设计理念和方法,是对传统设计的发展和完善。它以产品全生命周期为指导原则,在设计中以产品的环境资源属性为核心,除考虑产品的功能、安全性、寿命等常规技术要求和成本、价格等经济属性外,还要重点考虑产品全生命周期过程中对环境和资源的影响,是摇篮到摇篮的过程。它强调要有效地解决环境资源问题,就要从产品的先期阶段着手,在设计阶段就以全寿命周期的大局观最大限度地减少环境污染与节约资源,实现从源头解决问题。机械产品在其全生命周期中对资源和能源的输入量、对环境的输出量及这些输入输出对环境友好程度的综合评价指标,称为产品的“绿色度”^[24]。产品绿色度可以就环境意

识机械设计产品是否达到设计要求或设定目标,是否有改进的空间及其大小等加以评价分析,找到改进的方向与细则。由于机械产品的类型多种多样且相互之间差异巨大,产品的不同会导致对环境资源影响因素的不同,因此制定合理、全面、成熟的评价指标体系对于产品进行绿色度综合评价具有重大意义。

经过大量研究,已经初步建立绿色度评价的综合性原则、科学性原则、系统性原则、静态评价和动态评价相结合的原则、定性评价和定量评价相结合的原则等^[25,26],本文对以下原则进行了改进:

1) 层次性和不相容性原则:指标体系的构建按照一定的逻辑,从目标层开始自上而下地从宏观到微观、从抽象到具体分成若干层,形成金字塔状,上下层是统辖与隶属的关系,同一层评价指标个体之间互斥不重叠,简单扼要、全方位展现其特点。

2) 主次分明和舍次取主原则:评价指标应恰当展现绿色评价内容,不能过多过细导致指标过于繁琐相互重叠,又不能过少过简导致指标信息遗漏出现错误、不实现象,应舍弃次要评价指标,保留主要评价指标,主次分明,舍次取主。

3) 对立统一原则:效益型、成本型定性定量指标对指标评价的作用不同,要区别对待不同处理,以达到评价准确客观。

1.2 绿色评价指标体系

绿色评价要求建立一个系统、合理的综合评价指标体系,这个体系的总体结构实际上是对“绿色”本质的具体细化,是一种从宏观抽象概念到具体可衡量指标的层级划分。为了将这个抽象的理论构架落实到实际操作中可以具体衡量的数据上,就有必要细致地选取评价指标集。这些指标集通常是一个评价系统是否成功的关键,结合以往有关研究的成果,建立了如图1所示的绿色评价指标体系。该指标体系充分考虑了绿色评价的特点,反映了环境、资源、能源、经济、技术及特定属性等方面的基本属性。

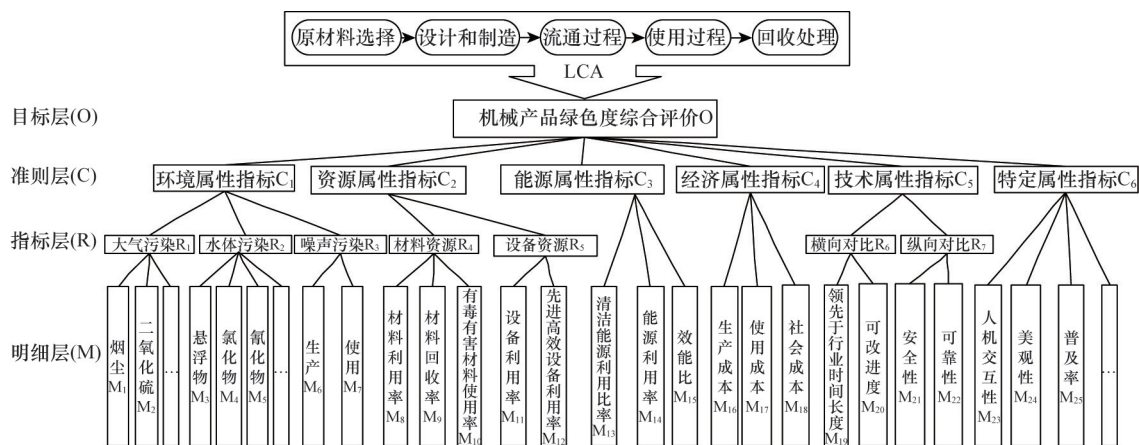


图1 机械产品绿色评价指标体系

Fig.1 Green evaluation product system of mechanical products

机械产品绿色度评价指标体系的层次划分以绿色度评价原则为基础,力求恰当简洁表达机械产品的特点,层层递进,直至最底层定性或定量描述,一般从上而下依次为目标层、准则层、指标层和明细层^[27]。

经过前期研究,环境属性、资源属性、能源属性、经济属性等指标已经初步建立,大家也初步取得了共识^[8,28,29],本文对技术属性指标进行改进,并提出特定属性指标,以便对环境意识设计更好地评价:

1) 技术属性指标主要表现为先进性,机械产品的先进性与绿色性是相互促进的,只有先进的技术才能保证产品在全生命周期内对环境的友好,在时间上是可持续的,而绿色度越大的产品与其他产品相比其必是先进的,在空间上是可持续的。指标可以从横向对比和纵向对比进行,横向对比主要指该机械产品在业内的领先程度及本产品与其他相类似产品进行对比后的可改进度等方面,纵向对比主要指该产品使用的安全性和可靠度,更新频度等方面。

2) 特定属性指标主要是考虑到机械行业子类如工程机械、农业机械等的特殊性而设置,对具体产品进行绿色度评价时,既要考虑机械行业的一般性,又要结合本子类行业的业内标准和特殊性,才能得到正确可靠的结果。另外,绿色评价指标很多,这在实践中实施起来有一定难度,建立起一种跨行业的但又适用产品本身的评价方法,使产品的一般共有评价指标模块化,评价的时候只是对特定指标进行评价,减少评价的重复性、复杂性,提高可实施性,这是未来研究的一个方向。

在图1评价指标体系中的明细层中,包括如安全性、客观性等定性指和材料利用率、设备利用率等效益型定量指标,也包括材料回收率、烟尘排放量等成本型定量指标,这说明了绿色产品的绿色度综合评价的复杂性,但也是有规律可循的。

2 基于模糊AHP-TOPSIS的环境意识设计相对绿色度评价

在分析机械产品属性指标并获取其信息并建立该产品评价指标体系后,进行基于模糊AHP-TOPSIS的环境意识设计机械产品相对绿色度评价,其流程图如图2所示。

2.1 利用模糊AHP求层次总排序结果

2.1.1 指标两两重要性比较语义变量及三角模糊数表

荷兰学者 Van Laarhoven 和 Pedrycz 在传统 AHP 的基础上提出了用三角模糊数表示模糊比较判断方法,建立层次结构模型、层次单排序及其一致性检验及层次总排序及其一致性检验均与传统 AHP 保持一致,故不赘述,下面简单阐述模糊 AHP 运用三角模糊数表示模糊比较判断确定权重方法^[30]。

在指标评价的两两比较矩阵中,三角模糊数 E_1 、 E_3 、 E_5 、 E_7 、 E_9 被用来代替传统的 1、3、5、7、9,而 E_2 、 E_4 、 E_6 、 E_8 是中间值,如表1所示。

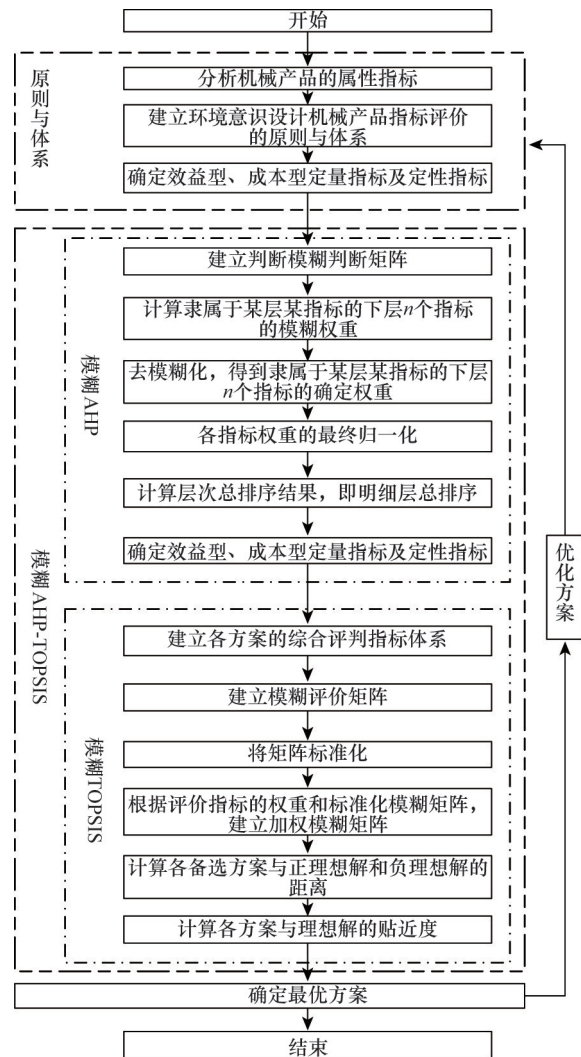


图2 基于模糊AHP-TOPSIS的环境意识设计评价体系及相对绿色度研究流程

Fig.2 Flow chart of evaluation system and the relative green degree of environmentally oriented design based on fuzzy AHP-TOPSIS

表1 评价指标两两重要性比较语义变量及三角模糊数表
Table 1 Semantics variables of importance comparison of two indicators and fuzzy triangular numbers

评价指标A和B的相对权重	模糊三角数	定义	说明
E_1	(1, 1, 2)	同等重要	A和B对目标具有同样的贡献
E_3	(2, 3, 4)	稍微重要	A比B稍微重要
E_5	(4, 5, 6)	重要	A比B重要
E_7	(6, 7, 8)	明显重要	A比B明显重要
E_9	(8, 9, 9)	非常重要	A比B非常重要
E_2, E_4, E_6, E_8	...	中间重要性	中间状态对应的标度值

2.1.2 利用模糊AHP求层次总排序

步骤1 求各分层指标相对于上一层的权重。

1) 建立模糊判断矩阵,以准则层为例,共有 t 个指标隶属于上一层,如表2所示,其余各层指标的求法与其一致。

表2 模糊判断矩阵
Table 2 Fuzzy judgement matrix

$O-C$	C_1	C_2	C_3	...	C_t
C_1	F_{11}	F_{12}	F_{13}	...	$F_{1 \times t}$
C_2	F_{21}	F_{22}	F_{23}	...	$F_{2 \times t}$
C_3	F_{31}	F_{32}	F_{33}	...	$F_{3 \times t}$
...
C_t	$F_{t \times 1}$	$F_{t \times 2}$	$F_{t \times 3}$...	$d_{t \times t}$

当有个专家对隶属于 $k-1$ 层某指标的 k 层 t 个指标进行评价时,对于矩阵中 i 行 j 列的某元素可用以下式(1)整合为一个模糊值。

$$F_{ij} = \frac{1}{Q} \oplus \sum_{q=1}^Q d_{ij}^q \quad (1)$$

式中, $d_{ij}^q = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$, $i, j = 1, 2, \dots, t$ 为某个专家给出的三角模糊数。

2) 计算隶属于 $k-1$ 层某指标的 k 层 t 个指标的模糊权重。

列出隶属于 $k-1$ 层某指标的 k 层 t 个指标的综合判断矩阵,再根据公式(2)求出模糊集 S_1, S_2, \dots, S_t ,它们表示隶属于 $k-1$ 层某指标的 k 层 t 个指标的模糊综合程度。

$$S_i = \sum_{j=1}^t F_{ij} \otimes \left(\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t F_{ij} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中,

$$\sum_{j=1}^t F_{ij} = \left(\sum_{j=1}^t l_{ij}, \sum_{j=1}^t m_{ij}, \sum_{j=1}^t u_{ij} \right)$$

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t F_{ij} = \left(\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t l_{ij}, \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t m_{ij}, \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t u_{ij} \right)$$

$$\left[\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t F_{ij} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t l_{ij}} \right)$$

3) 去模糊化,得到隶属于 $k-1$ 层某指标的 k 层 t 个指标的确定权重。

如果 F_1 和 F_2 是凸模糊数,模糊数 $F_1 \geq F_2$ 的概率水平定义为

$$G(F_1 \geq F_2) = \begin{cases} 1 & m_1 \geq m_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & m_1 < m_2, u_1 \geq l_2 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$F \geq F_1, F \geq F_2, \dots, F \geq F_t$ 的概率水平定义为

$$G(F \geq F_1, \dots, F_t) = G[(F \geq F_1) \text{ and } (F \geq F_2) \text{ and } \dots \text{ and } (F \geq F_t)] \quad (4)$$

$$= \min G(F \geq F_i) \quad i = 1, 2, \dots, t$$

假设

$$m(P_i) = \min G(F_i \geq F_j) \quad j = 1, 2, \dots, t; j \neq i \quad (5)$$

式中, P 代表准则层 C , 指标层 R , 明细层 M 中一项。

隶属于 $k-1$ 层某指标的 k 层 t 个指标的权重向量为

$$W' = (m(P_1), m(P_2), \dots, m(P_t))^T \quad (6)$$

4) 各指标权重的归一化。

对 W' 归一化,则得特征向量即权重为

$$W'' = (w(P_1), w(P_2), \dots, w(P_t))^T \quad (7)$$

式中, W'' 是非模糊数向量,给出了 k 层 t 个指标影响因素对 $k-1$ 层所隶属的指标的权重。

步骤2 计算层次总排序结果,即明细层总排序,如表3所示。

表3 层次总排序结果
Table 3 Overall sorting results

		C-R排序		R_1	R_2	...	R_f	
R-M 排序	C_1	*	*	*	*	*	*	明细 层总 排序
	...	*	*	*	*	*	*	
	C_t	*	*	*	*	*	*	
M_1			*	*	*	*	w_1	
M_2			*	*	*	*	w_2	
...			*	*	*	*	...	
M_n			*	*	*	*	w_n	

注:表中*代表根据相应公式计算出的数值。

假设明细层第 i 项 M 所隶属指标为 R , R 所隶属的指标为 C , C 所隶属的指标为 O , 则

$$w_i = w_M^O = w_C^O \times w_R^C \times w_M^R \quad (8)$$

式中, w_M^O 为明细层某指标 M 关于目标层 O 的权重, w_M^R 为明细层某指标 M 关于所隶属指标层指标 R 的权重, w_C^O 为指标层指标 R 关于所隶属准则层指标 C 的权重, w_C^O 为准则层指标 C 关于目标层 O 的权重。

说明细层共有 n 个指标,则层次总排序结果的形式为

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T \quad (9)$$

2.2 利用模糊TOPSIS选择最优方案

2.2.1 定性指标与定量指标的不同处理

在对各方案进行评价时,对于定性指标与定量指标,要区别对待不同处理。

对于定性指标,为了克服其模糊性和主观性,具体分为7个等级标准,用三角模糊数来描述,如表4所示。对于定量指标,只要把相对应的具体量值带入初始模糊评判矩阵对应位置即可。

2.2.2 利用模糊TOPSIS求方案权重

步骤1 建立各方案的综合评判指标体系,如表5所示。

步骤2 根据各方案的综合评判指标体系建立模糊评价矩阵。

表4 评价指标语义变量及三角模糊数
Table 4 Evaluation semantics variables and fuzzy triangular numbers

判断	模糊数
非常低(VL)	(0,0,0.1)
低(L)	(0,0.1,0.3)
较低(ML)	(0.1,0.3,0.5)
一般(M)	(0.3,0.5,0.7)
较高(MH)	(0.5,0.7,0.9)
高(H)	(0.7,0.9,1)
非常高(VH)	(0.9,1,1)

表5 各方案的综合评判指标体系
Table 5 Index system of comprehensive evaluation of various schemes

项目	方案1	方案2	...	方案s	
指标层(准则层)	明细层				
指标层 (准则层)1	明细层1	x_{11}	x_{21}	...	$x_{s \times 1}$
	...	x_{12}	x_{22}	...	$x_{s \times 2}$

...	
...	
...	
指标层 (准则层)N	
	明细层n	$x_{1 \times n}$	$x_{2 \times n}$...	$x_{s \times n}$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1 \times n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2 \times n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{s \times 1} & x_{s \times 2} & \dots & x_{s \times n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

步骤3 将矩阵X标准化为

$$R = [r_{ij}]_{s \times n} \quad (11)$$

定量指标:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - x_j^-}{x_j^+ - x_j^-}, x_{ij} \in I'; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \\ \frac{x_j^+ - x_{ij}}{x_j^+ - x_j^-}, x_{ij} \in I''; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (12)$$

式中, $x_j^+ = \max_j x_{ij}$ 为标准矩阵X中 x_{ij} 所在列的最大值, $x_j^- = \min_j x_{ij}$ 为标准矩阵X中 x_{ij} 所在列的最小值。

定性指标:

$$r_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right), x_{ij} \in I'; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \\ \left(\frac{a_j^-}{c_j^-}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), x_{ij} \in I''; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (13)$$

式中, 对于定性指标 (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}) , 当其为增益型指标时, $c_j^+ = \max\{a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}\}$ 为 a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} 中的最大值, 为成本型指标时, $a_j^- = \min\{a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}\}$ 为 a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} 的最小值。

I' 为增益性指标; I'' 为成本性指标。

步骤4 根据层次总排序结果和标准化模糊矩阵, 建立加权模糊矩阵为

$$V = [v_{ij}]_{1 \times n} = [r_{ij} \times w_j]_{1 \times n} \quad (14)$$

步骤5 构建模糊正理想解 A^+ 和模糊负理想解 A^- 分别为

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+\}, j=1,2,\dots,n \quad (15)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-\}, j=1,2,\dots,n \quad (16)$$

定量指标:

$$v_j^+ = \begin{cases} \max_j v_{ij}, v_{ij} \in I'; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \\ \min_j v_{ij}, v_{ij} \in I''; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \end{cases}$$

$$v_j^- = \begin{cases} \min_j v_{ij}, j \in I'; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \\ \max_j v_{ij}, j \in I''; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \end{cases}$$

式中, $\max_j x_{ij}$ 为标准矩阵V中 v_{ij} 所在列的最大值, $\min_j x_{ij}$ 为标准矩阵V中 v_{ij} 所在列的最小值。

定性指标:

$$v_j^+ = \begin{cases} (\max a_j, \max b_j, \max c_j), v_{ij} \in I'; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \\ (\min a_j, \min b_j, \min c_j), v_{ij} \in I''; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \end{cases}$$

$$v_j^- = \begin{cases} (\min a_j, \min b_j, \min c_j), v_{ij} \in I'; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \\ (\max a_j, \max b_j, \max c_j), v_{ij} \in I''; i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \end{cases}$$

步骤6 计算各备选方案与正理想解和负理想解的距离分别为

$$d_i^+ = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^+), i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \quad (17)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(v_{ij}, v_j^-), i=1,2,\dots,s; j=1,2,\dots,n \quad (18)$$

正负理想解中的三角模糊数分别为 $a=(a_1, a_2, a_3)$, $b=(b_1, b_2, b_3)$, 则它们之间的距离^[31]为

$$d(a, b) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]} \quad (19)$$

步骤7 计算各方案与理想解的贴近度为

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}, i=1,2,\dots,s \quad (20)$$

C_i 越大, 方案 A_i 越接近于理想值, 则各方案可根据 C_i 大小进行优劣排序。

3 实例

油锯作为森林采伐、造材、打枝等综合作业中不可缺少

的优良器械,在园林绿化、森林防火、木材加工、家具制造、建筑工程中得到了广泛应用,但在使用过程中产生的噪声和振动容易使操作者患上严重职业病,产生的尾气如烟尘、二氧化碳对大气产生了污染,是亟待绿化的机械产品^[32]。现有图3所示的关于某型号油锯的3种方案,他们在评价指标体系中各有不同。通过基于模糊AHP-TOPISS的环境意识设计机械产品相对绿色度综合评比一般步骤对方案进行评价,选出对人类更为有益的方案,并已通过计算机程序 MATLAB GUI 实现^[33],见图4、图5和图6。

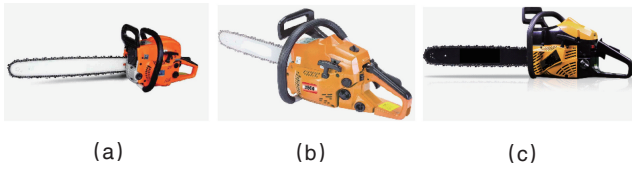


图3 某型号油锯的3种方案

Fig. 3 Three schemes of a chain saw

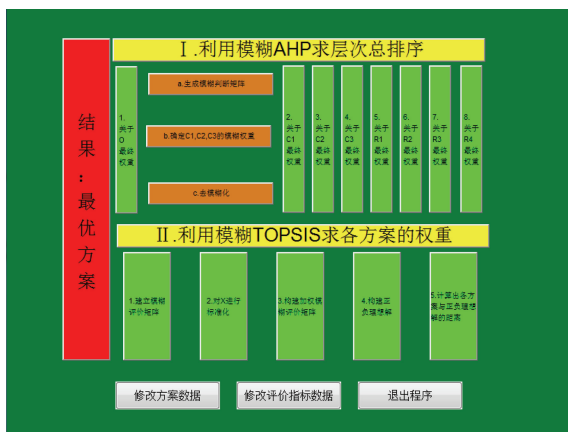


图4 输出各步骤结果

Fig. 4 Output results in every procedure

建立各方案的综合评价指标体

指标	方案1	方案2	方案3
烟尘 (mg/m ³)	20.3	15.7	18.2
二氧化硫 (mg/m ³)	83.5	96.4	91.5
生产 (dB)	120	110	100
使用 (dB)	81	75	90
材料利用率 (%)	76.5	82.3	79.9
材料回收率 (%)	20.8	15.2	23.3
有毒有害材料使用率 (%)	3.6	7.1	5.3
设备利用率 (%)	81.6	76.8	73.9
先进设备利用率 (%)	40.3	46.7	41.1
人机交互性	[0.30.50.7]	[0.50.70.9]	[0.10.30.5]
美观性	[0.50.70.9]	[0.50.70.9]	[0.70.91]
普及率 (%)	75.3	80.2	85.1

图5 修改方案数据

Fig. 5 Data of modified schemes

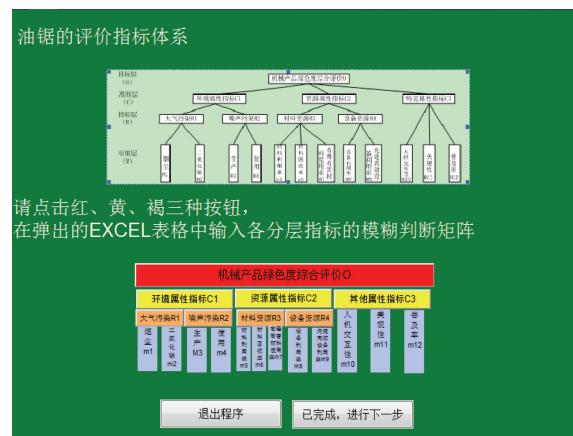


图6 修改评价指标数据

Fig. 6 Modification of data of evaluation index

1) 综合考虑具体属性,建立油锯的评价指标体系,如图7所示。

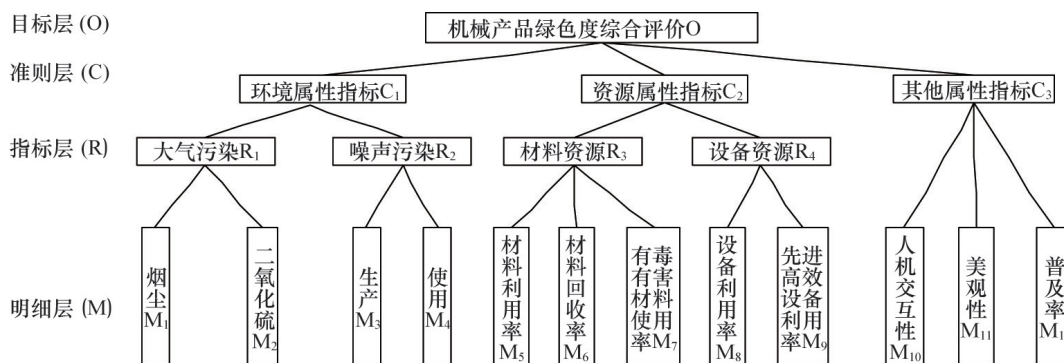


图7 油锯的评价指标体系

Fig. 7 Evaluation index system of chain saw

2) 用模糊 AHP 求层次总排序结果。

步骤 1 求各分层指标相对于上一层的权重,由专家建立评估模糊判断,以准则层为例,其余各层的指标的求法与其一致。

(1) 建立 O-C 模糊判断矩阵,如表 6 所示。根据式(1)取整合为一个模糊值,如表 7 所示。

表 6 初始专家模糊判断矩阵

Table 6 Original fuzzy judgement matrix

O-C 排序	C ₁	C ₂	C ₃
C ₁	(1, 1, 1)	(1, 2, 3) (2, 3, 4) (1, 1, 2)	(1/2, 1, 1) (1/2, 1, 1) (1/3, 1/2, 1)
C ₂	(1/3, 1/2, 1) (1/4, 1/3, 1/2) (1/2, 1, 1)	(1, 1, 1)	(1, 1, 2) (1, 2, 3) (1, 1, 2)
C ₃	(1, 1, 2) (1, 1, 2) (1, 2, 3)	(1/2, 1, 1) (1/3, 1/2, 1) (1/2, 1, 1)	(1, 1, 1)

表 7 合并模糊判断矩阵

Table 7 Integrated fuzzy judgement matrix

O-C 排序	C ₁	C ₂	C ₃
C ₁	(1, 1, 1)	(1.333, 2, 3)	(0.444, 0.833, 1)
C ₂	(0.361, 0.611, 0.833)	(1, 1, 1)	(1, 1.333, 2.333)
C ₃	(1, 1.333, 2.333)	(0.444, 0.833, 1)	(1, 1, 1)

(2) 根据式(2)计算 C₁, C₂, C₃ 模糊权重。

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 F_{ij} = (1, 1, 1) + (1.333, 2, 3) + (0.444, 0.833, 1) + \dots + (0.444, 0.833, 1) + (1, 1, 1) = (7.582, 9.943, 13.499)$$

$$\sum_{j=1}^3 F_{1j} = (1, 1, 1) + (1.333, 2, 3) + (0.444, 0.833, 1)$$

$$= (2.777, 3.833, 5)$$

$$S_1 = \sum_{j=1}^3 F_{1j} \otimes \left(\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 F_{ij} \right)^{-1}$$

$$= (2.777, 3.833, 5) \otimes (7.582, 9.943, 13.499)^{-1}$$

$$= \left(\frac{2.777}{13.499}, \frac{3.833}{9.943}, \frac{5}{7.582} \right)$$

$$= (0.206, 0.385, 0.659)$$

$$S_2 = (0.175, 0.296, 0.549)$$

$$S_3 = (0.181, 0.319, 0.571)$$

(3) 去模糊化,根据式(3)、式(4)求出 C₁, C₂ 与 C₃ 的权重。

$$G(S_1 \geq S_2) = 1$$

$$G(S_1 \geq S_3) = 1$$

$$G(S_2 \geq S_1) = \frac{0.206 - 0.549}{(0.296 - 0.549) - (0.385 - 0.206)} = 0.794$$

$$G(S_2 \geq S_3) = \frac{0.181 - 0.549}{(0.296 - 0.549) - (0.319 - 0.181)} = 0.941$$

$$G(S_3 \geq S_1) = \frac{0.206 - 0.571}{(0.319 - 0.571) - (0.385 - 0.206)} = 0.847$$

$$G(S_3 \geq S_2) = 1$$

$$m(C_1) = \min G(S_1 \geq S_2, S_3) = 1$$

$$m(C_2) = \min G(S_2 \geq S_1, S_3) = 0.794$$

$$m(C_3) = \min G(S_3 \geq S_1, S_2) = 0.847$$

根据式(5)、(6),得

$$W' = (1, 0.794, 0.847)$$

(4) 将以上权重归一化,根据式(7)得到准则层各指标的最终权重。

$$W'' = (w_{C_1}^o, w_{C_2}^o, w_{C_3}^o)$$

$$= \left(\frac{1}{1 + 0.794 + 0.847}, \frac{0.794}{1 + 0.794 + 0.847}, \frac{0.847}{1 + 0.794 + 0.847} \right)$$

$$= (0.379, 0.300, 0.321)$$

步骤 2 计算层次总排序结果。

根据式(8),以求 M₁ 为例, M₂~M₁₁ 见表 8。

$$w_{M_1}^o = w_{C_1}^o \times w_{R_1}^{C_1} \times w_{M_1}^{R_1} = 0.379 \times 0.652 \times 0.153 = 0.038$$

$$W = (0.038, 0.209, 0.068, 0.064, 0.179, 0.054, 0.010, 0.037, 0.020, 0.093, 0.039, 0.189)^T$$

表 8 层次总排序结果

Table 8 Overall sorting results

R-M 排序	O-C 排序	C-R 排序				
		C ₁	R ₁	R ₂	R ₃	
排序	C ₁	0.379	0.652	0.348		明细层
	C ₂	0.300		0.811	0.189	总排序
	C ₃	0.321				C ₃
M ₁		0.153				0.038
M ₂		0.847				0.209
M ₃			0.514			0.068
M ₄			0.486			0.064
M ₅				0.736		0.179
M ₆				0.222		0.054
M ₇				0.042		0.010
M ₈					0.652	0.037
M ₉					0.348	0.020
M ₁₀						0.291 0.093
M ₁₁						0.122 0.039
M ₁₂						0.587 0.189

3) 用模糊 TOPSIS 选择最优方案。

步骤 1 建立各方案的综合评判指标体系,如表 9 所示。

步骤 2 根据式(10)建立模糊评价矩阵。

表9 油锯各方案的综合评判指标体系
Table 9 Index system of comprehensive evaluation of various schemes

项目		方案1	方案2	方案3
指标层(准则层)	明细层			
大气污染	烟尘/(mg·m ⁻³)	20.3	15.7	18.2
	二氧化硫/(mg·m ⁻³)	83.5	96.4	91.5
噪声污染	生产/dB	120	110	100
	使用/dB	81	75	90
材料资源	材料利用率/%	76.5	82.3	79.9
	材料回收率/%	20.8	15.2	23.3
	有毒有害材料使用率/%	3.6	7.1	5.3
设备资源	设备利用率/%	81.6	76.8	73.9
	先进高效设备利用率/%	40.3	46.7	41.1
其他属性指标	人机交互性	(0.3,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.9)	(0.1,0.3,0.5)
	美观性	(0.5,0.7,0.9)	(0.5,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1)
	普及率/%	75.3	80.2	85.1

$$X = \begin{bmatrix} 20.3 & 83.5 & 120 & 81 & 76.5 & 20.8 & 3.6 & 81.6 & 40.3 & (0.3,0.5,0.7) & (0.5,0.7,0.9) & 75.3 \\ 15.7 & 96.4 & 110 & 75 & 82.3 & 15.2 & 7.1 & 76.8 & 46.7 & (0.5,0.7,0.9) & (0.5,0.7,0.9) & 80.2 \\ 18.2 & 91.5 & 100 & 90 & 79.9 & 23.3 & 5.3 & 73.9 & 41.1 & (0.1,0.3,0.5) & (0.7,0.9,1) & 85.1 \end{bmatrix}$$

步骤3 根据式(11)、(12)、(13)对X进行标准化。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.6 & 0 & 0.691 & 1 & 1 & 0 & (0.333,0.556,0.778) & (0.5,0.7,0.9) & 0 \\ 1 & 0 & 0.5 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0.377 & 1 & (0.556,0.778,1) & (0.5,0.7,0.9) & 0.5 \\ 0.457 & 0.380 & 1 & 0 & 0.586 & 1 & 0.514 & 0 & 0.125 & (0.111,0.333,0.556) & (0.7,0.9,1) & 1 \end{bmatrix}$$

步骤4 根据式(14)构建加权模糊评价矩阵。

$$V = \begin{bmatrix} 0 & 0.209 & 0 & 0 & 0.124 & 0.037 & 0.01 & 0.037 & 0 & (0.031,0.052,0.072) & (0.02,0.027,0.035) & 0 \\ 0.038 & 0 & 0.034 & 0.064 & 0 & 0 & 0 & 0.014 & 0.02 & (0.052,0.072,0.093) & (0.02,0.027,0.035) & 0.095 \\ 0.017 & 0.079 & 0.068 & 0.038 & 0.179 & 0.054 & 0.005 & 0 & 0.003 & (0.01,0.031,0.052) & (0.027,0.035,0.039) & 0.189 \end{bmatrix}$$

步骤5 根据式(15)、(16)构建正、负理想解。

$$\begin{bmatrix} A^+ \\ A^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.038 & 0.209 & 0.068 & 0.064 & 0.179 & 0.054 & 0.01 & 0.037 & 0.02 & (0.052,0.072,0.093) & (0.027,0.035,0.039) & 0.189 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (0.01,0.031,0.052) & (0.02,0.027,0.035) & 0 \end{bmatrix}$$

步骤6 根据公式(17)、(18)、(19)计算出各方案与正、负理想解的距离。

$$d_1^* = \sqrt{(0.038-0)^2 + (0.209-0.209)^2 + \dots + \frac{1}{3}[(0.052-0.031)^2 + (0.072-0.052)^2 + (0.039-0.072)^2] + \dots + (0.189-0)^2} = 0.224$$

$$d_1^- = 0.228, d_2^* = 0.255, d_2^- = 0.055, d_3^* = 0.042, d_3^- = 0.254$$

步骤7 根据公式(20)计算各方案与理想解的相对贴近度。

$$C_1 = 0.504, C_2 = 0.177, C_3 = 0.858$$

由于C₃>C₁>C₂,所以方案3为最优方案。

4 结论

构建了环境意识设计机械产品指标评价的原则与体系,并严格区分了效益型和成本型定性指标、效益型和成本型定量指标,并将模糊AHP和模糊TOPSIS评价法相结合对环境

意识设计机械产品评价体系及相对绿色度综合评价,使评价更为科学。实例验证表明,基于模糊AHP-TOPSIS的绿色度评价方法在理论上具有科学性,在实践中具有可操作性,是一种有效方法。

参考文献(References)

- [1] 刘志峰, 刘光复, 李钢. 绿色设计与绿色制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Liu Zhifeng, Liu Guangfu, Li Gang. Green design and green manufacture[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [2] 高洋. 基于多目标决策的绿色产品设计方案生成方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
Gao Yang. The generating method research of green product design scheme based on multi-objective decision[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [3] 吴克烈. 关于绿色壁垒的战略思考[J]. 国际贸易问题, 2002(5): 51-54.
Wu Kelie. The strategic thinking about green barriers[J]. Journal of International Trade, 2002(5): 51-54.
- [4] 曹利军, 李晓明, 韩文辉. “绿色壁垒”挑战及我国的应对策略[J]. 科技导报, 2003, 21(1): 23-26.
Cao Lijun, Li Xiaoming, Han Wenhui. The challenge of "green barriers" and our countermeasures[J]. Science & Technology Review, 2003, 21(1): 23-26.
- [5] 何忠伟. 绿色壁垒的经济学分析与对策[J]. 科技导报, 2003, 21(10): 59-61.
He Zhongwei. Economic analysis and countermeasure of green barriers[J]. Science & Technology Review, 2003, 21(10): 59-61.
- [6] 傅志红, 彭玉成. 产品的绿色设计方法[J]. 机械设计与研究, 2000(2): 10-12.
Fu Zhihong, Peng Yucheng. Green design for products[J]. Machine Design and Research, 2000(2): 10-12.
- [7] 杨旭静, 李传乾. 绿色产品设计及其关键技术研究综述[J]. 机械设计, 2001, 18(3): 1-3, 44.
Yang Xujing, Li Chuanqian. Review of the research on green product design and its key technology[J]. Journal of Machine Design, 2001, 18(3): 1-3, 44.
- [8] 向东, 张根保, 汪永超, 等. 绿色产品及其评价指标体系研究[J]. 计算机集成制造系统, 1999, 5(4): 14-19.
Xiang Dong, Zhang Genbao, Wang Yongchao, et al. The basic concept and evaluation methods of green product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1999, 5(4): 14-19.
- [9] 姜峰, 李青海, 李剑峰, 等. 基于LCA法的包装材料环境友好性的评价[J]. 山东大学学报: 工学版, 2006, 36(6): 10-13, 41.
Jiang Feng, Li Qinghai, Li Jianfeng, et al. The assessment of the packaging materials' environmental friendly character based on the LCA methodology[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2006, 36(6): 10-13, 41.
- [10] 王文渊. 基于LCA的产品概念设计关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2007: 5-7.
Wang Wenyuan. The key techniques of product conceptual design based on LCA[D]. Jinan: Shandong University, 2007: 5-7.
- [11] 辛兰兰. 面向机电产品方案设计的绿色特征建模[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(4): 713-718.
Xin Lanlan. Green feature modeling for mechanical and electrical product conceptual design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(4): 713-718.
- [12] 赵志强, 韩雪飞, 陈世杰, 等. 基于LCA和TRIZ的产品生态设计方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 11-14.
Zhao Zhiqiang, Han Xuefei, Chen Shijie, et al. Method of LCA and TRIZ product eco-design[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 36(1): 11-14.
- [13] 黄春林, 张建强, 沈淞涛. 生命周期评价综述[J]. 环境技术, 2004(1): 29-32.
Huang Chunlin, Zhang Jianqiang, Shen Songtao. Summarize of Life Cycle Assessment[J]. Environmental Technology, 2004(1): 29-32.
- [14] 霍李江. 生命周期评价(LCA)综述[J]. 中国包装, 2003(1): 42-46.
Huo Lijiang. The review of LCA[J]. China Packaging, 2003(1): 42-46.
- [15] Kuo T C, Chang S H, Huang S H. Environmentally conscious design by using fuzzy multi-attribute decision-making[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(3-4): 209-215.
- [16] Kuo T C, Wu H H, Shieh J I. Integration of environmental considerations in quality function deployment by using fuzzy logic[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 36(3): 7148-7156.
- [17] 刘志峰, 许永华, 刘学平, 等. 绿色产品评价方法研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(9): 968-971.
Liu Zhifeng, Xu Yonghua, Liu Xueping, et al. The method research of green product evaluation[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(9): 968-971.
- [18] 刘英平, 高新陵, 沈祖谟. 基于改进层次分析法的绿色产品评价方法研究[J]. 机械设计与研究, 2004, 21(4): 9-12.
Liu Yingping, Gao Xinling, Shen Zuyi, et al. Study on evaluation method of green product based on modified analytic hierarchy process[J]. Machine Design and Research, 2004, 21(4): 9-12.
- [19] 陈伟, 张华, 张立华. 基于TOPSIS方法的绿色制造工艺综合评价[J]. 机械制造, 2004, 42(7): 28-30.
Chen Wei, Zhang Hua, Zhang Lihua, et al. The comprehensive evaluation of green manufacturing technology based on TOPSIS[J]. Machinery, 2004, 42(7): 28-30.
- [20] 黄梅芳, 王应明. 基于模糊TOPSIS方法的绿色供应商评价与选择[J]. 物流技术, 2013, 32(2): 207-210, 270.
Huang Meifang, Wang Yingming. Evaluation and selection of green suppliers based on fuzzy TOPSIS[J]. Logistics Technology, 2013, 32(2): 207-210, 270.
- [21] 陈建, 赵燕伟, 李方义, 等. 基于转换桥方法的产品绿色设计冲突消解[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 132-141.
Chen Jian, Zhao Yanwei, Li Fangyi, et al. Transforming bridge-based conflict resolution for product green design[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 132-141.
- [22] 孙良峰, 裘乐淼, 张树有, 等. 基于泛逻辑推理的复杂产品融合绿色性分析的设计方案评价技术[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(8): 1990-1999.
Sun Liangfeng, Qiu Lemiao, Zhang Shuyou, et al. Evaluation of design scheme for complex product combined with green performance based on generalized logic analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(8): 1990-1999.
- [23] 高洋. 绿色产品加权MET矩阵的评估方法研究[J]. 机械设计与研究, 2008, 24(3): 10-14.
Gao Yang. The research of green products assessment method based on weighing MET matrix[J]. Machine Design and Research, 2008, 24(3): 10-14.
- [24] 刘红旗, 陈世兴. 产品绿色度的综合评价模型和方法体系[J]. 中国机

- 械工程, 2000, 11(9): 1013-1016.
- Liu Hongqi, Chen Shixing. The evaluation model and method system of product green degree[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(9): 1013-1016.
- [25] 张海秀, 刘晓叙. 机电产品绿色度的评价体系[J]. 机械制造与研究, 2007, 36(6): 14-16.
- Zhang Haixiu, Liu Xiaoxu. The degree evaluation system of electromechanical products[J]. Machine Building & Automation, 2007, 36(6): 14-16.
- [26] 周胜. 基于模糊层次分析法的机电产品绿色度综合评价的研究与实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2002: 21-22.
- Zhou Sheng. The research and implementation of comprehensive evaluation of mechanical and electrical product green degree based on fuzzy analytic hierarchy process[D]. Hangzhou: Zhengjiang University, 2002: 21-22.
- [27] 乔昆, 支海波, 苏青, 等. 绿色项目管理的评价体系研究[J]. 科技导报, 2005, 23(8): 42-45.
- Qiao Kun, Zhi Haiibo, Su Qing, et al. Study on green project management assessment (GPMA)[J]. Science & Technology Review, 2005, 23(8): 42-45.
- [28] 史彦敏. 基于解释结构模型的产品绿色设计方案评价[J]. 机械设计, 2009, 26(5): 37-39.
- Shi Yanmin. Evaluation on the green design scheme of product based on interpretative structural model[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(5): 37-39.
- [29] 夏英祝, 祖书君. 绿色壁垒和绿色壁垒效应[J]. 农业经济问题, 2004(1): 63-65.
- Xia Yingzhu, Zu Shujun. Green barriers and the effect of the green barriers[J]. Issues in Agricultural Economy, 2004(1): 63-65.
- [30] Chang D. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 95(3): 649-655.
- [31] Chen C. Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 114(1): 1-9.
- [32] 卢云峰, 陈建, 赵燕伟, 等. 油锯产品减振降噪研究现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备, 2010, 38(8): 11-12, 15.
- Lu Yunfeng, Chen Jian, Zhao Yanwei, et al. Research status and development trend on vibration and noise reduction of chainsaw[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2010, 38(8): 11-12, 15.
- [33] 陈建, 张胜良, 李鑫. MATLAB GUIDE 程序设计中参数在内部函数间及不同窗口间传递方式研究[J]. 软件导刊, 2015, 14(9): 12-16.
- Chen Jian, Zhang Shengliang, Li Xin. Transmittal Modes among Functions or Figures of Parameters in MATLAB GUIDE[J]. Software Guide, 2015, 14(9): 12-16.

Evaluation system and relative green degree of environmentally oriented design based on fuzzy AHP-TOPSIS

CHEN Jian, ZHANG Shengliang, LI Xin, CHEN Kun

Key Lab of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Ministry of Education; Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310014 China

Abstract To solve the problems of the index's fuzziness and the corresponding weight's incompleteness in the evaluation of various schemes of mechanical products in an environmentally oriented design, a synthetical study method of the relative green degree based on the fuzzy AHP-TOPSIS is developed to improve the related solutions. The advantages of the fuzzy AHP and the fuzzy TOPSIS are well combined. Firstly the fuzzy AHP is applied to divide the indexes into an orderly hierarchy to determine the weight of each hierarchy level. Then the fuzzy AHP-TOPSIS is established combined with the fuzzy AHP to determine the optimal scheme according to the degree of closeness between certain qualitative and quantitative indices of benefit and of cost and the ideal solution. Both the quantitative and qualitative indices of benefit and of cost are distinguished strictly, and the principle and the systems of index evaluation of mechanical products by environmentally oriented design are established based on the full life circle. The case analysis shows that it is reasonable in theory and functional in practice, as a result, it is effective and feasible.

Keywords AHP; fuzzy AHP-TOPSIS; environmentally conscious mechanical design; green design; green degree

(责任编辑 吴晓丽)