

DOI:10.13196/j.cims.2015.03.007

基于绿色特征的方案设计快速生命周期评价方法

孟 强,李方义⁺,李 静,周丽蓉,纪芹芹

(山东大学 机械工程学院高效洁净机械制造教育部重点实验室,山东 济南 250061)

摘 要:为解决常规生命周期评价方法由于固有的周期长、数据需求量大等缺点而难以适用于产品的方案设计阶段问题,提出一种基于绿色特征的快速生命周期评价方法;建立了绿色特征模型筛选设计方案中的绿色信息。采用模糊集合理论中的直觉模糊数对定性特征值进行了研究;采用 Monte Carlo 法处理定量特征,并将其标准差作为不确定性因子进行不确定性分析。选择合适的生命周期影响评价方法进行生命周期影响评价,得到生命周期评价结果,以完成产品设计方案的环境影响评价,从而支持产品的绿色设计。通过某公司变速箱前箱体实例对所提快速生命周期评价理论进行了验证。

关键词:快速生命周期评价;绿色特征;方案设计;不确定性;直觉模糊数;Monte Carlo 方法;产品设计
中图分类号:TH12;TH16 **文献标识码:**A

Green features-based rapid life cycle assessment method for conceptual design

MENG Qiang, LI Fang-yi⁺, LI Jing, ZHOU Li-rong, JI Qin-qin

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education,
School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To solve the conventional Life Cycle Assessment (LCA) inherent limitations such as long period, large number data requirement which led it difficult to support product conceptual design, a green features-based Rapid Life Cycle Assessment (RLCA) method was proposed. The green features model was established to extract and screen the green information. In view of a certain degree of uncertainty in green information, the uncertainty analysis must be done. The intuitionistic fuzzy numbers of fuzzy set theory were used to research the qualitative features, Monte Carlo methods were used to dispose the quantitative features and the standard deviation was regard as the uncertainty factor to do uncertainty analysis. The appropriate Life Cycle Impact Assessment (LCIA) method was selected to complete the life cycle impact assessment and obtain the LCA results. Consequently, the environmental impact assessment of the product design program was completed to support product green design. A front box of a gearbox was used as an example case to verify the proposed RLCA theory.

Key words: rapid life cycle assessment; green features; conceptual design; uncertainty; intuitionistic fuzzy numbers; Monte Carlo methods; product design

0 引言

传统的生命周期评价方法按照生命周期评价步骤,将花费大量的时间和精力对数据进行收集和处

理,并且数据的准确性在很大程度上影响了评价结果的可靠性。为克服传统的生命周期评价固有的费用高、耗时长、数据需求量大、数据精确度要求高等缺点,国内外的组织机构和学者均提出了简化型生

收稿日期:2014-01-07;修订日期:2014-04-02。Received 07 Jan. 2014; accepted 02 Apr. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175312);国家 863 计划资助项目(2014AA041503)。**Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 51175312), and the National High-Tech. R&D Program, China (No. 2014AA041503).

命周期评价思想。

国际环境毒理与环境化学学会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)的简化生命周期评价报告率先提出了简化生命周期评价的思想和方法。张晓璐等首先对他人的研究成果和相关部门的统计数据进行了清单分析,然后利用简化的一致化方法处理清单数据,最后进行生命周期影响评价,并以空调为案例进行了分析^[1]。Ryu等统计分析了11种生命周期评价在生命周阶段和数据采集方面的简化方法^[2]。Greadel等提出了半定量加权——ERPR(environmentally responsible products products rating)矩阵,并以不同电子产品为例进行了分析^[3]。Hur等基于矩阵方法提出一种简化生命周期评价方法,从而能够快速识别和筛选出对产品环境影响较大的因素^[4]。高洋等利用简化的生命周期评价(Life Cycle Assessmer, LCA)方法评估了消费类产品的绿色性^[5]。上述简化的生命周期评价方法一般是在现有的技术框架或者模型的基础上,通过简化生命周期阶段、环境影响类型和数据,从而可以通过现有的生命周期数据和工具实现生命周期评价。虽然该方法降低了评价成本、缩短了评价时间,但是同时会降低生命周期评价的准确性和可靠性。

在LCA过程中的不确定信息处理方面,莫华等基于质量指标法和Monte Carlo法提出一种数据质量评价指标体系^[6];Lloyd等认为Monte Carlo法和模糊理论可用于处理定量的不确定信息以支持定量决策分析,但未对定性不确定信息进行应用研究^[7]。Benetto等利用模糊处理技术提出了改进的NAIADE方法,对LCA中的不确定性进行了综合分析^[8]。Lo等提出了一种将贝叶斯与Monte Carlo法相结合的不确定性分析方法,以降低生命周期评价过程中的不确定性^[9]。Wang等通过多元回归分析对方案选择带来的不确定性进行了研究^[10]。朱立红提出了定性定量相结合的综合分析方法对生命周期影响(Life Cycle Impact, LCI)进行不确定性分析^[11]。以上学者在生命周期清单分析中对清单数据的质量、不确定性和如何降低不确定性等方面做了深入研究,但是在如何量化处理不确定信息方面的研究还比较少。

本文提出快速生命周期评价方法,通过绿色特征映射等技术提取设计方案中的绿色信息,并从定性和定量两方面分别采用模糊理论和Monte Carlo

法对其中的不确定信息进行了量化处理,保证了LCA结果的准确性。

1 快速生命周期评价(RLCA)模型

在产品设计的早期阶段,一般都要进行产品方案设计。方案设计对产品的结构性能、环境性能和成本等有着决定性影响,是产品绿色设计的关键阶段。但方案设计对设计人员的约束比较少,设计信息也很不确定,相关绿色信息获取困难。方案的绿色特征包含了方案绿色性评价所需的信息,如何得到方案的绿色特征是对方案进行绿色性评价的关键。为快速获得产品方案的绿色特征,本文建立绿色特征模型,通过特征映射从常规设计信息中提取绿色特征,得到设计方案的绿色特征矩阵。方案设计中存在的大量不确定信息将影响评价结果的准确性。因此,为保证评价结果的准确性,要对这些不确定信息进行处理,从而获得较为准确的量化模型,以进行进一步的生命周期影响评价。最终得到评价结果,完成设计方案的快速生命周期评价,如图1所示。

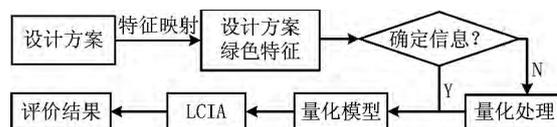


图1 快速生命周期评价模型图

2 产品方案绿色特征的提取

绿色特征是一种将常规设计信息按照一定法则映射到绿色特征集中的产品设计信息表达形式。因为绿色特征更多地关注与产品绿色性相关的设计信息,所以基于绿色特征的产品设计方案表达可以更直观地体现产品方案的绿色性,便于对产品方案进行绿色性评价。

2.1 绿色特征

常规设计主要考虑产品功能结构的实现、工艺的可行性和产品的经济性等,这些性能在产品的设计参数中表现为材料的选择、加工方式和加工参数等^[12]。而绿色设计是在尽可能不降低产品性能、不增加生产成本的基础上,着重优化产品的能耗、排放、噪音和回收等与环境影响相关的性能。本文基于课题组前期的工作,引入“绿色特征”的概念^[13],建立了常规设计变量和绿色属性之间的映射关系,从而在产品的常规设计信息中提取和筛选绿色信

息,并对设计域内的绿色信息进行集成表达。

基于集合理论,绿色特征(Green Feature, GF)是一组包含产品全生命周期内所有零部件绿色信息的集合,可描述为

$$GF = F_T \cup F_I \cup F_G. \quad (1)$$

式中:

$F_T = \{T_i, i=1 \text{ to } n \mid \text{原材料获取,生产制造,包装运输,}\dots\}$;

$F_I = \{I_j, j=1 \text{ to } m \mid \text{零部件 1, 零部件 2, 零部件 3,}\dots\}$;

$F_G = \{G_k, k=1 \text{ to } p \mid \text{材料特征,能量特征,排放特征,}\dots\}$ 。

由式(1)可以看出,绿色特征包含三方面的信

材料获取 加工制造 存储运输 使用维护 … 报废处理

$$IT = \begin{bmatrix} IT_{11} & IT_{12} & IT_{13} & IT_{14} & \dots & IT_{1n} \\ IT_{21} & IT_{22} & IT_{23} & IT_{24} & \dots & IT_{2n} \\ IT_{31} & IT_{32} & IT_{33} & IT_{34} & \dots & IT_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ IT_{m1} & IT_{m2} & IT_{m3} & IT_{m4} & \dots & IT_{mn} \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{零部件 1} \\ \text{零部件 2} \\ \text{零部件 3} \\ \vdots \\ \text{零部件 } m \end{matrix}. \quad (2)$$

$$GF = IT \cdot F_G = \begin{bmatrix} IT_{11} & IT_{12} & \dots & IT_{1n} \\ IT_{21} & IT_{22} & \dots & IT_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ IT_{m1} & IT_{m2} & \dots & IT_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1() & F_2() & \dots & F_k() \\ F_1() & F_2() & \dots & F_k() \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ F_1() & F_2() & \dots & F_k() \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{t=1}^n F_1(IT_{1t}) & \sum_{t=1}^n F_2(IT_{1t}) & \dots & \sum_{t=1}^n F_k(IT_{1t}) \\ \sum_{t=1}^n F_1(IT_{2t}) & \sum_{t=1}^n F_2(IT_{2t}) & \dots & \sum_{t=1}^n F_k(IT_{2t}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{t=1}^n F_1(IT_{mt}) & \sum_{t=1}^n F_2(IT_{mt}) & \dots & \sum_{t=1}^n F_k(IT_{mt}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在获得方案的设计信息矩阵(IT 矩阵)之后,基于绿色特征与产品设计参数之间的映射关系,建立绿色特征映射矩阵 FG;然后将 IT 矩阵与 FG 矩阵进行广义相乘,从而得到绿色特征矩阵 GF,如式(3)所示。此处借用矩阵形式表达设计信息,以矩阵相乘的数学格式提取并表达绿色信息,而不是数学意义上的矩阵和矩阵相乘。

一般情况下,基于绿色特征的产品方案表达包含了产品方案全生命周期所有零部件的绿色信息,因此,将式(3)中的同类绿色特征进行聚合,即将矩阵中的每一列进行叠加,如式(4)所示,从而得到产品设计方案的绿色特征。

息。从时间角度看,绿色特征包括产品从原材料的采集到生产制造、包装运输、使用维护以至产品的报废处理、回收再利用的全生命周期过程;从产品结构的角度看,绿色特征涵盖了产品的所有零部件;从映射关系角度看,绿色特征实现了由常规设计参数到绿色设计信息的转换。

2.2 设计方案绿色特征提取过程

设计信息矩阵 IT 是矩阵 F_T 与矩阵 F_I 组合运算的结果。它将方案设计中各零部件的常规设计信息按照材料获取、加工制造、存储运输、使用维护和报废处理等生命周期阶段以矩阵广义相乘的形式表示出来:

$$GF_k = \sum_{t=1}^n F_k(IT_{1t}) + \sum_{t=1}^n F_k(IT_{2t}) + \dots + \sum_{t=1}^n F_k(IT_{mt}) = \sum_{h=1}^m \sum_{t=1}^n F_k(IT_{ht}). \quad (4)$$

最终,基于绿色特征产品的设计方案可以表达为:

$$GF = (GF_1 \quad GF_2 \quad \dots \quad GF_k). \quad (5)$$

通过绿色特征的映射,从产品设计信息中寻找相关信息,完成基于绿色特征的产品表达。绿色特征属性在定义时充分考虑了不同人群的关注点,因此分析产品绿色特征中的属性,即可获得与评价相关的数据信息,完成评价清单,实现产品方案的评价。

3 不确定信息的定量化处理

通过第 2 章所建立的绿色特征模型,将设计方案中的非绿色信息进行剔除。绿色信息则表现为绿色特征中的定性信息和定量信息,这些信息往往具有一定程度的不确定性,将影响评价结果的准确性。因此,需要对难以确定的绿色特征值进行处理分析。本文采用模糊集合理论中的直觉模糊数对定性特征值进行研究;采用 Monte Carlo 法对定量特征进行仿真分析,将其标准差作为不确定性因子进行不确定性分析。不确定信息处理的技术路线如图 2 所示。

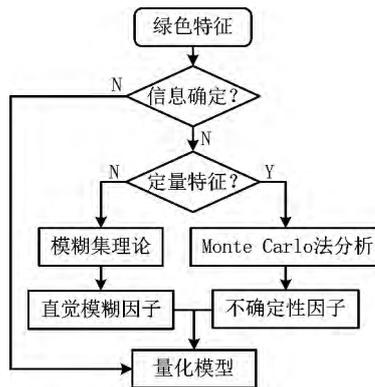


图2 不确定信息处理技术路线

3.1 定性特征处理

在绿色特征的提取过程中,部分特征(如材料稀缺性、可拆卸性等)无法具体量化,需要通过一些模糊数量和语言进行评价,例如:“很多”、“较少”、“优秀”、“很差”等。直觉模糊数是处理和量化这些模糊评价的较好工具,可以将语言变量转化成表 1 中的直觉模糊数^[14]。因为绿色特征是经过多个子特征聚合得到的,所以对于某不确定的定性绿色特征,可以根据其各子特征的模糊数,通过加权计算得到集成的模糊数,即该绿色特征的值。为了方便,本文结

合文献^[15]的研究,给出直觉模糊数的相关概念和运算规律。

表 1 语言变量与直觉模糊数对应表

语言变量	直觉模糊数	语言变量	直觉模糊数
极差	(0.05, 0.95, 0.00)	较好	(0.65, 0.25, 0.10)
很差	(0.15, 0.80, 0.05)	好	(0.75, 0.15, 0.10)
差	(0.25, 0.65, 0.10)	很好	(0.85, 0.10, 0.05)
中下	(0.35, 0.55, 0.10)	极好	(0.95, 0.05, 0.00)
中	(0.50, 0.40, 0.10)		

(1) 直觉模糊集定义

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是一个非空集合,则称

$$A = \{[x, \mu_A(x), \nu_A(x)] \mid x \in X\} \quad (6)$$

为直觉模糊集,其中 $\mu_A(x)$ 和 $\nu_A(x)$ 分别为 X 中元素 x 属于 A 的隶属度和非隶属度,即 $\mu_A: X \rightarrow [0, 1], \nu_A: X \rightarrow [0, 1]$,且 $0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1, \forall x \in X$ 。为方便起见,称 $\alpha = (\mu_\alpha, \nu_\alpha)$ 为直觉模糊数^[14]。此外,

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x), \forall x \in X, \quad (7)$$

表示 X 中元素 x 属于 A 的犹豫度或不确定度。

(2) 运算法则

$$\alpha_1 \oplus \alpha_2 = (\mu_{\alpha_1} + \mu_{\alpha_2} - \mu_{\alpha_1}\mu_{\alpha_2}, \nu_{\alpha_1}\nu_{\alpha_2}); \quad (8)$$

$$\lambda \alpha = [1 - (1 - \mu_\alpha)^\lambda, \nu_\alpha^\lambda], \lambda > 0. \quad (9)$$

(3) 加权平均算子

$$IFWA_\omega(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \omega_1 \alpha_1 \oplus \omega_2 \alpha_2 \oplus \dots \oplus \omega_n \alpha_n. \quad (10)$$

其中 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 为 $\alpha_j (j=1, 2, \dots, n)$ 的权重向量, $\omega_j \in [0, 1] (j=1, 2, \dots, n), \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。

为方便应用,本文假设某不确定绿色特征由 5 个子特征 $GF_{i1}, GF_{i2}, GF_{i3}, GF_{i4}$ 和 GF_{i5} 聚合而成,其每个子特征的模糊特征值及其对绿色特征的重要性如表 2 所示。根据表 1 中的对应关系,各子特征的直觉模糊数如表 3 所示。

表 2 各子特征的特征值及重要性

绿色特征	GF_{i1}	GF_{i2}	GF_{i3}	GF_{i4}	GF_{i5}
特征值	好	很好	很好	中等	极好
子特征重要性	重要	中等	非常重要	中等	重要
直觉模糊数	(0.75, 0.15, 0.10)	(0.85, 0.10, 0.05)	(0.85, 0.10, 0.05)	(0.50, 0.40, 0.10)	(0.95, 0.05, 0.00)

表 3 各子特征的对应的直觉模糊数

绿色特征	GF_{i1}	GF_{i2}	GF_{i3}	GF_{i4}	GF_{i5}
直觉模糊数	(0.75, 0.15, 0.10)	(0.85, 0.10, 0.05)	(0.85, 0.10, 0.05)	(0.50, 0.40, 0.10)	(0.95, 0.05, 0.00)

子特征重要程度的语言变量与直觉模糊数的对应关系如表 4 所示。

表 4 子特征的重要性

语言变量	直觉模糊数
非常重要	(0.90, 0.05, 0.05)
重要	(0.75, 0.20, 0.05)
中等	(0.50, 0.40, 0.10)
不重要	(0.25, 0.60, 0.15)
非常不重要	(0.10, 0.80, 0.10)

设第 K 个子特征的重要性程度用直觉模糊数 $D_k = (\mu_k, \nu_k, \pi_k)$ 来表示, 参照文献[17], 其权重可以用式(11)计算:

$$\lambda_k = \frac{\mu_k + \frac{\pi_k \mu_k}{\mu_k + \nu_k}}{\sum_{k=1}^n \left(\mu_k + \frac{\pi_k \mu_k}{\mu_k + \nu_k} \right)} \quad (11)$$

式中: $\lambda_k \geq 0; \sum_{k=1}^n \lambda_k = 1; k = 1, 2, \dots, n$ 。

因此, 根据表 4 中的对应关系和式(11), 可得到 5 个子特征的权重, 如表 5 所示。

表 5 各个子特征的权重值

绿色特征	GF_{i1}	GF_{i2}	GF_{i3}	GF_{i4}	GF_{i5}
权重	0.22	0.15	0.26	0.15	0.22

利用模糊运算法则(式(8)、式(9))和直觉模糊加权平均算子(式(10))计算得到直觉模糊数 $\alpha = (0.84, 0.10)$ 。由此可知, 该绿色特征值为 0.84, 该属性非常接近“很好”水平。不确定性度 $\pi_\alpha = 1 - 0.84 - 0.10 = 0.06$ 。

3.2 定量特征处理

绿色特征是经过多个子特征聚合得到的, 因此对于某不确定的定量绿色特征, 可以利用行业内同特征样本容量统计值的计算均值和变化系数计算标准差, 从而利用 Monte Carlo 仿真分析, 得到绿色特征值, 并对数据不确定性进行分析。对于 Monte Carlo 仿真中的概率分布函数, 由于获得统计量的概率分布函数很难, 可以利用拟合分析的方法来确定统计量的概率分布函数。常用的概率分布函数有正态分布、对数正态分布、卡方分布、离散均匀分布、 F 分布、泊松分布和 t 分布等。

假设某不确定的定量绿色特征 GF_i 由 $GF_{i1}, GF_{i2}, GF_{i3}, GF_{i4}$ 和 GF_{i5} 5 个子特征聚合而成, 由于

在子特征数据收集中存在不确定性因素, 从而导致绿色特征 GF_i 不确定。为了研究绿色特征 GF_i 的不确定性, 首先根据行业内的样本统计, 得到各子特征 GF_{ij} 的平均值和变化系数, 并通过拟合分析的方法来确定各子特征的概率分布函数。表 6 为假定的 5 个子特征的行业内统计值情况。

表 6 定量不确定绿色特征值

特征值	平均值	变化系数	概率分布
GF_{i1}	10	0.2	离散均匀分布
GF_{i2}	50	0.1	正态分布
GF_{i3}	80	0.3	正态分布
GF_{i4}	5	0.1	正态分布
GF_{i5}	100	0.2	离散均匀分布

然后通过 MATLAB 软件进行 Monte Carlo 仿真, 得到各子特征的 10 个随机仿真数值, 如表 7 所示。

表 7 Monte Carlo 模拟各子特征的随机数值

特征值	随机仿真数据									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GF_{i1}	9.8	10.9	11.7	9.4	10.9	11.9	10.7	11.5	9.4	10.8
GF_{i2}	52.0	47.8	48.5	48.7	46.2	46.4	55.7	49.9	50.9	54.4
GF_{i3}	97.8	104.7	84.7	55.9	70.5	98.2	106.4	65.4	51.0	85.4
GF_{i4}	6.0	5.0	4.0	4.8	5.0	4.6	4.9	5.1	4.9	5.9
GF_{i5}	99.8	96.2	104.6	97.9	104.5	104.5	103.4	97.8	101.4	100.6
$\sum GF_{ij}$	255.6	264.6	253.5	216.7	226.2	265.6	281.1	229.7	217.6	257.1

对上表中的 $\sum GF_{ij}$ 求均值, 即可得到由 Monte Carlo 法求得绿色特征 GF_i 的值: $GF_i = 1/10 \sum \sum GF_{ij} = 246.8$ 。另外, 经计算可得其标准差为 22.48。由此可知, 该绿色特征的特征值为 246.8, 其标准差即不确定性因子为 22.48。

4 环境影响评价

生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)是通过清单分析所提供的物耗、能耗和排放数据进行表征评价, 确定产品系统的物能交换对其外部环境(生态系统、人体健康、资源消耗等)的影响。LCIA 经过众学者和组织的研究已经比较成熟。目前国际上比较有代表性的评价方法有很多种, 通常将 LCIA 方法分为中点方法和端点方法^[18]两类。前者侧重于环境的影响类别及其作用机理, 它使用各种特征因素来描述各种环境干扰因

素的相对重要性;后者则重点关注环境影响问题的因果关系。许多研究者得出的结论是:对于相同的清单数据,使用不同的影响评价方法可能得出不同的影响评价结果^[19-21]。目前,国际主流的 LCIA 方

法有 CML 2002, Eco-indicator 99, EDIP2003, EPS 2000, Ecopoints2006, IMPACT 2002, LIME 等。典型的生命周期评价方法在影响类型划分方面的对比如表 8 所示。

表 8 典型生命周期影响评价方法对比

评价方法	CML	Eco-Indicator	EDIP	EPS	Eco Points
影 响 类 别	全球变暖	气候变化	全球变暖	潜藏资源消耗	CO ₂ , SO ₂
	富营养化	富营养化	富营养化	预期寿命	
	酸化潜势	酸化潜势	酸化潜势	致病、致畸	
	非生物资源消耗	化石燃料消耗	资源消耗	农作物产量	能量
	臭氧层损耗	矿产消耗	臭氧层损耗	鱼、肉产量	灰尘
	光化学氧化	土地占用	光化学烟雾	水资源量	COD、P、NH ₃ 、N
	人体致毒	臭氧层损耗	人体生态致毒	林木生产力	高中低放射性
	陆地生态毒害	辐射作用	水体生态致毒	严重烦躁	金属(土壤: Cd, Hg, Pb, Zn;
	水生生态毒害	生态毒性	土壤生态致毒	物种灭绝	水体: Cr, Cu, N)
	海洋生态毒害	无机呼吸损伤	固体废物	土壤酸化	硝酸盐与杀虫剂(土壤)
		有机呼吸损伤			特殊固体废物

以上方法各有特点,可以根据待评价产品的特点及其主要的环境影响类型来选择 LCIA 方法。例如:水泥等建材对环境的主要影响有非生物资源耗竭、全球变暖、酸化潜势、富营养化、人体生态毒性和光化学氧化等^[22];汽车零部件等机械产品的主要环境影响类型有能源消耗、全球变暖、酸化潜势、富营养化、臭氧层损耗和光化学烟雾等^[23];木质纤维的主要环境影响类型有温室效应、酸化潜势、富营养化、光化学烟雾和人体生态毒性^[24];空心砖和混凝土砌块的主要环境影响类型有温室效应、不可再生资源消耗、酸化效应和光化学烟雾等^[25];包装材料的主要环境影响类型有矿石和化石燃料的消耗、全球变暖、土地占用、酸化潜势和富营养化等^[26]。选定 LCIA 方法后,按照 LCIA 的步骤对清单数据进行评价。GB 24040-2008 和 GB 24044-2008 规定的生命周期评价步骤如图 3 所示。

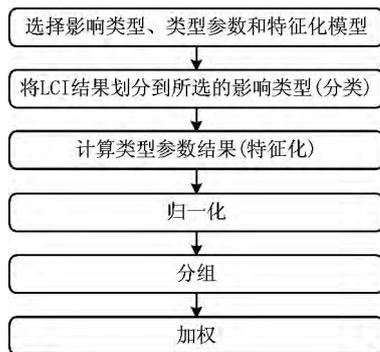


图3 生命周期评价步骤

5 实例验证

选取某公司变速箱前箱体作为实例进行简单分析,对本文的研究方法和理论模型进行验证说明。

5.1 绿色特征提取

本实例重点分析材料选取和制造过程内容,涉及的数据用于对该阶段的快速评价。因此,将主要选取该变速箱箱体的材料特征及制造特征的属性进行分析。

通过在某工程机械公司的实际调研,获得变速箱前箱体的部分设计信息,如式(12)所示:

$$IT = \begin{matrix} \text{材料类型} & \text{零件坯重/kg} & \text{加工部位} & \text{公差等级} \\ \left[\begin{array}{ll} \text{HT250} & 130 \end{array} \right. & \begin{array}{l} \text{小端} \\ \text{大端} \\ \text{上平面} \\ \text{右端} \\ \text{左端} \\ \text{大小端孔} \\ \text{侧面孔} \end{array} & \begin{array}{l} 8 \\ 8 \\ 9 \\ 9 \\ 9 \\ 8 \\ 8 \end{array} \end{matrix} \quad (12)$$

通过特征映射可得该变速箱前箱体的材料绿色特征如式(13)所示:

$$GF_1 = \begin{matrix} \text{材料类型} & \text{材料用量 /kg} & \text{是否限用 / 禁用} \\ \left[\begin{array}{ll} \text{HT250} & 130 \\ \text{漆料} & 0.51 \end{array} \right. & \begin{array}{l} \text{无要求} \\ \text{无要求} \end{array} \end{matrix} \quad (13)$$

制造绿色特征如式(14)所示:

$$GF_2 = \left[\begin{array}{cccc} \text{耗水 /kg} & \text{耗电 /kwh} & & \\ \text{噪声 /dB} & \text{切削液 /kg} & \text{粉尘 /mg} \cdot \text{m}^{-3} & \\ 2 & 97 & 85 & 0.25 \end{array} \right] \quad (14)$$

其中,在制造过程的特征映射中,耗电数据存在较为严重的不确定性。下面将对耗电数据进行不确定性分析。

5.2 不确定信息处理

加工过程中消耗的电能统计过程中存在不确定信息,通过统计和估算可以得到其 7 个部分各自的耗电量和不确定范围,如表 9 所示。

表 9 前箱体制造过程耗电

特征	数值/Kwh	不确定范围/%
GF_{221}	11.0	±5
GF_{222}	15.5	±5
GF_{223}	6.0	±5
GF_{224}	3.5	±5
GF_{225}	20.5	±5
GF_{226}	18.5	±5
GF_{227}	22.0	±5

取各子特征的分布规律均为标准正态分布,通过 MATLAB 软件进行 Monte Carlo 仿真,得到各子特征的 10 个随机仿真数值,如表 10 所示。

表 10 Monte Carlo 模拟各子特征的随机数值

特征	随机仿真数值										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
GF_{221}	11.3	12.0	9.8	11.5	11.2	10.3	10.8	11.2	13.0	12.5	11.3
GF_{222}	14.5	17.9	16.1	15.5	16.1	15.3	15.4	16.7	16.6	16.6	16.0
GF_{223}	6.2	5.6	6.2	6.5	6.1	6.3	6.2	5.9	6.1	5.8	6.1
GF_{224}	3.7	3.3	3.3	3.4	3.0	3.8	3.6	3.4	3.7	3.2	3.4
GF_{225}	20.4	20.3	20.8	20.8	19.6	20.5	20.3	21.1	21.6	21.6	20.7
GF_{226}	17.7	18.6	17.4	17.5	18.5	19.9	17.8	18.8	18.3	19.5	18.4
GF_{227}	20.8	22.0	22.6	23.2	23.7	22.1	20.4	21.2	20.8	24.6	22.1
GF_{22}	94.5	99.7	96.2	98.3	98.2	98.2	94.4	98.3	100.1	103.8	98.2

由此可知,该绿色特征的特征值为 98.2,其标准差即不确定性因子为 2.78。汇总绿色特征,得到该设计方案的主要绿色数据,如表 11 所示。

表 11 变速箱箱体绿色数据汇总

数据类型	符号	数据值	单位
钢材	GF_{11}	130	kg
漆料	GF_{12}	0.51	kg
水	GF_{21}	2	kg
电能	GF_{22}	98.2	Kwh
噪音	GF_{23}	85	dB(A)
切削液	GF_{24}	0.2	kg
粉尘	GF_{25}	5	mg/m ³

根据表中的数据信息,选择 Eco-indicator99 评价方法,根据实际情况选择合适的当量系数及权重系数,得到该方案评价结果为 16.5 Pt。

6 结束语

本文主要介绍了如何在方案设计阶段快速地完

成对方案的评价。首先,简述了基于绿色特征的快速生命周期评价流程,之后对流程中的各项内容分别进行了详述。基于绿色特征模型,提取设计方案中的绿色特征,并对其中难以确定的绿色特征从定性和定量两方面进行了量化处理;最后选择 LCIA 方法对方案进行环境影响评价,从而高效且相对准确地完成产品设计方案的环境影响评价,为支持产品优化设计提供了必要的的数据支持。但是,目前的数据尚不能直接指导产品的优化设计,亟需建立产品环境影响评价结果同产品设计信息间的关联关系。这将是下一步需要完成的工作。

参考文献:

- [1] ZHANG Xiaolu. Simplified method of life cycle assessment and its case study[D]. Guangzhou:Guangdong University of Technology,2013(in Chinese). [张晓璐. 简化生命周期评价方法及其案例研究[D]. 广州:广东工业大学,2013.]
- [2] RYU J Y, KIM I. Simplified life cycle assessment for Eco design[C]//Proceedings of the 2003 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. Washington, D. C., USA:IEEE,2003:459-463.

- [3] GRAEDEL T E. Weighted matrices as product life cycle assessment tools[J]. *International Journal of LCA*,1996,1(2):86-89.
- [4] HUR T, LEE J, RYU J, et al. Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system[J]. *Journal of Environmental Management*,2005,75(3):229-237.
- [5] GAO Yang, LIU Zhifeng, HUANG Haihong, et al. The research of green products assessment method based on weighing MET matrix[J]. *Machine Design & Research*,2008(3):10-14 (in Chinese). [高洋, 刘志峰, 黄海鸿, 等. 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(3):10-14.]
- [6] MO Hua, ZHANG Tianzhu. Data quality assessment of life cycle inventory analysis[J]. *Research of Environmental Science*,2003(5):55-58(in Chinese). [莫华, 张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价[J]. *环境科学研究*,2003(5):55-58.]
- [7] LLOYD S M, RIES R. Characterizing, propagating, and analyzing uncertainty in life-cycle assessment; a survey of quantitative approaches[J]. *Journal of Industrial Ecology*,2007,11(1):161-179.
- [8] BENETTO E, DUJET C, ROUSSEAU P. Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment[J]. *Environmental Modelling and Software*,2008,23(12):1461-1467.
- [9] LO S C, MA H W, LO S L. Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method[J]. *Science of the Total Environment*,2005,340(1-3):23-33.
- [10] WANG L, LI F, LI J, et al. Sensitivity and uncertainty analysis of life-cycle assessment based on multivariate regression analysis[C]//Proceeding of the 5th International Conference on Responsive Manufacturing, Washington, D. C. , USA; IEEE,2010:184-191.
- [11] ZHU Lihong. Uncertainty analysis of te inventory in LCA of product[D]. Hefei: Hefei University of Technology,2012(in Chinese). [朱立红. 产品生命周期评价中清单的不确定性分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.]
- [12] LI Peigang. Theory and method research on product conceptual design based on function-structure model[D]. Jinan: Shandong University,2010(in Chinese). [李沛刚. 基于功构模式的产品概念设计理论和方法研究[D]. 济南:山东大学,2010.]
- [13] XIN Lanlan, JIA Xiujie, LI Fangyi, et al. Green feature modeling for mechanical and electrical product conceptual design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*,2012,18(4):713-718(in Chinese). [辛兰兰, 贾秀杰, 李方义, 等. 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.]
- [14] ZHANG Shifang. Several method for fuzzy multiple attribute decision-making with applications[D]. Xi'an: Xidian University,2012(in Chinese). [张市芳. 几种模糊多属性决策方法及其应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.]
- [15] ATANASSOV K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*,1986,20(1):87-96.
- [16] XU JZ S. Intuitionistic fuzzy aggregation operators[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*,2007,15(6):1179-1187.
- [17] BORAN F E, GENÇ S, KURT M, et al. A multi-criteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method[J]. *Expert Systems with Applications*,2009,36(8):11363-11368.
- [18] FINNVEDEN G, MICHAEL Z. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*,2009,91(1):1-21.
- [19] BOVEA M D, GALLARDO A. The influence of impact assessment methods on materials selection for eco-design[J]. *Materials and Design*,2006,27(3):209-215.
- [20] RALUY R G, SERRA L. Life-cycle assessment of desalination technologies integrated with energy production systems[J]. *Desalination*,2004,167(1/2/3):445-458.
- [21] SEO S, ARAMAKI T. Environmental impact of solid waste treatment methods in Korea[J]. *Journal of Environmental Engineering*,2004,130(1):81-89.
- [22] XU Xiaoning. Life cycle assessment of cement in China[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2013(in Chinese). [徐小宁. 中国水泥工业的生命周期评价[D]. 大连:大连理工大学,2013.]
- [23] LIU Zhichao. Life cycle assessment methodology of original manufacturing and remanufacturing of an engine[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2013(in Chinese). [刘志超. 发动机原始制造与再制造全生命周期评价方法[D]. 大连:大连理工大学,2013.]
- [24] SONG Jie. The life cycle assessment of fiber manufacturing process of MDF[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2013(in Chinese). [宋杰. MDF 纤维制造过程的生命周期评价[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.]
- [25] FANG Minghui. The life cycle assessment of typical wall materials[D]. Beijing: Beijing University of Technology,2013(in Chinese). [房明慧. 典型墙体材料的生命周期评价[D]. 北京:北京工业大学,2013.]
- [26] KONECZNY K. Environmental assessment of municipal waste wste mnagement senarios[M]. Ispra, Italy: European Commission Joint Research Centre,2007.

作者简介:

- 孟强(1989—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向:产品全生命周期分析、绿色设计, E-mail: mengqiang1623@qq.com;
- +李方义(1969—),男,山东德州人,教授,博士生导师,研究方向:绿色设计方法、产品全生命周期分析、绿色制造和再制造,通信作者, E-mail: lifangyi2006@qq.com;
- 李静(1989—),女,山东威海人,硕士研究生,研究方向:产品全生命周期分析、绿色设计;
- 周丽蓉(1989—),女,贵州贵阳人,硕士研究生,研究方向:产品全生命周期分析、绿色设计;
- 纪芹芹(1988—),女,山东烟台人,硕士研究生,研究方向:产品全生命周期分析、绿色设计。