

Sustainable Energy-Based Low-Carbon Product Performance Evaluation Method

Ling Yu

Intertek Testing Services Ltd., Shanghai
Email: xiaoxiao_new@163.com

Received: Apr. 21st, 2014; revised: Apr. 28th, 2014; accepted: May 2nd, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In the low-carbon design process of sustainable energy-based product, there are complex qualitative and quantitative knowledge and information in the design object of low-carbon product. It is a challenge to evaluate low-carbon design solutions in the sustainable energy-based low-carbon product design with the incomplete qualitative and quantitative information. This paper established sustainable energy-based product low-carbon design performance evaluation model for decision-making system based on design catalog. In this paper, a comprehensive evaluation of the design catalog for sustainable energy-based products based on multi-objective weighted fuzzy analytic hierarchy process was achieved, through the establishment of a sustainable energy-based low-carbon product design evaluation decision framework. With multi-objective weighted fuzzy analytic hierarchy process, fuzzy qualitative knowledge in low-carbon design will be transferred into quantitative data to realize intelligent evaluation. The model contains five modules: structure evaluation module, evaluation weight solution module, evaluation modules, select module and knowledge management module. It has proved that the above performance evaluation method of low-carbon product based on sustainable energy can effectively support product design and evaluation of low-carbon decisions.

Keywords

Sustainable Energy, Fuzzy Evaluation, Low-Carbon Design, Design Catalog, Analytic Hierarchy Process, Design for Environment

基于可持续能源的低碳产品性能评价方法研究

郁 灵

上海天祥质量技术服务有限公司, 上海
Email: xiaoxiao_new@163.com

收稿日期: 2014年4月21日; 修回日期: 2014年4月28日; 录用日期: 2014年5月2日

摘要

在基于可持续能源的产品设计过程中, 产品低碳设计对象具有大量的定性和定量相结合的复杂知识, 而如何利用上述不完备信息实现基于可持续能源的产品低碳设计的方案评价问题, 是当前面临的一个挑战。本文通过建立基于可持续能源的低碳产品设计评价决策体系框架, 实现了面向设计目录的基于可持续能源的产品多目标加权模糊层次分析法的综合评价。该模型采用多目标加权模糊层次分析法将低碳产品设计阶段的大量模糊定性知识转化成定量数据, 从而实现智能化评价。该模型主要包含了五个模块: 评价项构造模块、评价项权重求解模块、综合评价模块、设计师选择模块以及知识库管理模块。实践证明: 上述基于可持续能源的产品低碳性能评价方法能够有效地支持产品低碳设计与评价决策。

关键词

可持续能源, 模糊评价, 低碳设计, 设计目录, 层次分析法, 面向环境的设计

1. 引言

可持续能源(Sustainable energy)是指可持续的能源供应, 它能满足现今一代的需要, 而又不会损害后代满足他们需要的能力[1]。我国新能源行业, 特别是太阳能、风能、水能、沼气能等可持续能源行业, 虽然取得了长足的发展, 但仍不能够完全摆脱高能耗、高排放及劳动密集型的状态[2]。联合国政府间气候变化专门委员会发布评估报告[3]指出: 全球气候异常现象主要由温室气体排放所致[4], 对人类的生产生活严重影响[5]。2009年国务院宣布: 到2020年单位国内生产总值碳排放水平要比2005年减少40%~45%[6]。上述指标对我国基于可持续能源的产品设计提出了以低碳为核心的环境性能要求。

而产品碳足迹(Carbon footprint)作为衡量温室气体排放情况的一项重要指标, 它表征了产品全生命周期所引起的直接与间接的温室气体排放量, 是指某个产品在其整个生命周期内的各种温室气体排放, 即从原材料一直到生产(或提供服务)、分销、使用和处置/再生利用等所有阶段的温室气体排放[7], 其范畴包括二氧化碳、甲烷、一氧化二氮、氢氟碳化合物、全氟化合物和六氟化硫等多种温室气体。

基于可持续能源的产品碳足迹的研究意义十分重大。一方面, 使管理者能够有效地监测各种碳足迹环节, 特别是高碳排放环境, 从而制定基于可持续能源的产品节能减排政策和规划, 提高节能减排政策实施的效率, 淘汰落后产能、调整产业结构; 第二方面, 为制造业提供了一种产品全生命周期碳足迹的核算方法, 便于企业自身查找高碳排放的原因; 第三方面, 碳足迹认证已经成为一种国际潮流, 而我国要在基于可持续能源的产品低碳认证上取得主动, 必须研究相关的低碳产品设计、评价和论证方法。

基于太阳能、风能、水能、沼气能等可持续能源[8]的产品低碳设计过程中的许多问题在一定程度上都可以归结为评价决策过程。例如, 为满足特定的低碳设计要求, 设计师从大量的可行设计方案中选取满意的、达到设计要求的低碳设计方案的设计活动。一般的说, 产品设计与评价决策模型可以分为两类: 一类称之为数值计算模型, 一般仅用于评价问题及其所涉及的因素能够完全定量表示时, 此时设计决策问题简化为对数值计算模型的求解问题; 另一类则是非数值模型计算方法, 它广泛应用于定性和定量因素相结合的、特别是以定性因素为主的设计评价决策问题。

在基于可持续能源的产品低碳设计阶段，由于产品信息的不完备性和不确定性，使得设计师如何将这些定性知识和定量知识应用于低碳设计中，成为一大研究热点，如基于层次分析法[9]的专家系统[10]、基于模糊数学方法[11]、基于统计原理的评价方法[12]等，但当前的研究尚未取得有效的研究成果。在当前的各种评估模型中，所采用的评估思想多为最优原则，而实际应用中每一个低碳设计方案都是一个完整的整体，都要求有若干个子目标，往往要求的不是单个评价项最优，而是各评价项的综合最优。

本文针对基于可持续能源的产品设计，提出了基于设计目录评价树的多目标加权模糊层次分析法，有效地将设计知识、环境知识、可持续能源知识等各类定性和定量知识进行整合，并对各个评价项进行权衡，全面求得满意的低碳设计方案，并且使得各评价项能够最大限度的相互适应。由设计师根据实际情况，在备选设计方案中进行择优，能够有效地解决并实现低碳设计过程中方案的各评价项的综合择优，实现基于可持续能源的产品设计的评价决策智能化。

2. 基于可持续能源的低碳产品设计评价决策体系框架

目前国际上对于产品碳足迹的定义尚未有统一的表述，一般认为：产品碳足迹主要是指产品全生命周期内所排放的与气候变化相关的气体总量，反映的是评价对象所释放的温室气体数量(以二氧化碳当量作为计算单位)以及对气候的影响。因此，必须将产品碳足迹信息集成在相关的设计知识库中。

设计目录是德国学者 K. Roth[13]率先提出的一种集成设计知识的新型知识库，并发展成为基于特征的设计目录结构用于表达定性的产品设计知识。根据设计要求，采用基于特征的设计目录求解得到的设计方案均为可行方案。而可持续能源的低碳产品评价的根本问题就是从这组备选的方案中选取低碳足迹的设计方案。为此，建立如图 1 所示的可持续能源的低碳产品设计评价体系框架。该框架分为五个关键模块：

- 1) 评价项构造模块：在设计目录中建立低碳产品评价项、构建低碳产品综合评价模型。由于低碳设计阶段产品信息的不完备和不确定性，使得人们只能对低碳产品方案的各评价项做出“很好”、“好”，“一般”、“差”等程度的模糊评价，并用模糊集合[14] [15]来描述。
- 2) 评价项权重求解模块：层次分析法[9]考虑了最优方案的原则，可求出在评价项构造模块中的各评价项的相对权重。
- 3) 综合评价模块：根据设计目录中的模糊评价集合和评价项权重求解模块中得到的各评价项的权重，通过模糊数学提供的方法进行运算，将定性的判断转化成模糊的、可供定量比较的数据，即可得到定量

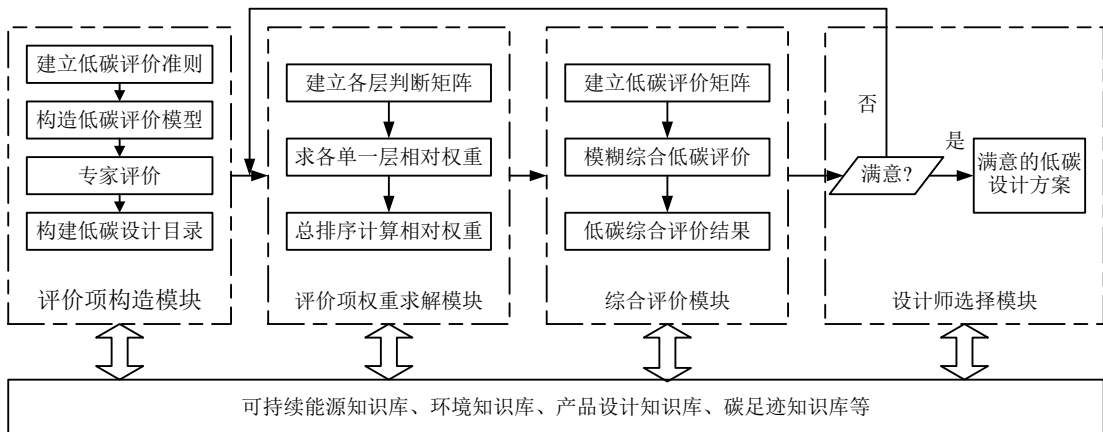


Figure 1. Evaluation system framework of low carbon product design for Sustainable energy
图 1. 基于可持续能源的低碳产品设计评价决策体系框架

的低碳产品评价结果，称之为优先级系数。

4) 设计师选择模块：知识库把备选低碳产品方案、评价树模型和评价准则及选中的低碳产品方案等的知识收集起来，并嵌入到低碳产品设计评价体系框架中。该低碳产品知识库可以独立地提供各种可供选择的方案，以及通过方案技术性、经济性和环境性的综合评价后得到的相关结果。设计师可以通过人机交互手段，从中选出最合适的方案。

5) 知识库模块：知识库模块作为整个评价系统的支撑，将可持续能源知识库、环境知识库、产品设计知识库和碳足迹知识库进行有机整合，形成支持基于可持续能源的低碳产品设计评价决策体系框架。

3. 多目标加权模糊层次分析法的评价流程

3.1. 评价项构造模块

3.1.1. 评价准则和评价树模型的建立

如图 2 所示，建立目标层、准则层和评价层三层次体系结构。三个层次之间形成逐层映射，如目标层映射并细化到准则层指标，而准则层指标进一步映射并细化评价层指标，从而形成可持续能源的低碳产品设计评价树。

针对可持续能源的低碳产品来说，可以用经济性 A_1 、技术性 A_2 和环境性 A_3 来进行低碳产品方案评价。经济性因素主要考查制造成本 B_1 、维护成本 B_2 和使用成本 B_3 ；技术性因素包括原材料 B_4 、生产 B_5 、分销 B_6 、使用 B_7 和再生利用 B_8 产品全生命周期的相关技术性能等；环境性因素包括碳足迹 B_9 、环境友好性 B_{10} 和安全性 B_{11} 等子因素。从而形成基于可持续能源的产品低碳设计评价树：以基于可持续能源的低碳产品方案评价目标 O 为根节点，以经济性 A_1 、技术性 A_2 和社会性 A_3 为分支节点，以制造成本 B_1 、维护成本 B_2 、碳足迹 B_9 和环境友好性 B_{10} 等为叶节点。

3.1.2. 专家评价和设计目录的集成

首先，建立评价集和评语集如下：评价集 $U = [B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10}, B_{11}]$ ，评语集 $V = [极好, 很好, 好, 较好, 一般, 较差, 差, 很差, 极差]$ ，并分别赋予相应的权值系数 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10，可记为 $WV_i = [wv_1, wv_2, wv_3, wv_4, wv_5, wv_6, wv_7, wv_8, wv_9] = [90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10]$ 。

在基于可持续能源的低碳产品的有关背景、数据和情况及低碳产品设计要求的基础上，由专家们对评价集的各因素 $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, B_8, B_9, B_{10}, B_{11}$ 进行评价。如在对某方案的“利用风能作为动力源”评价项的专家评价过程中，21%的专家认为极好，29%认为很好，28%认为好，13%认为

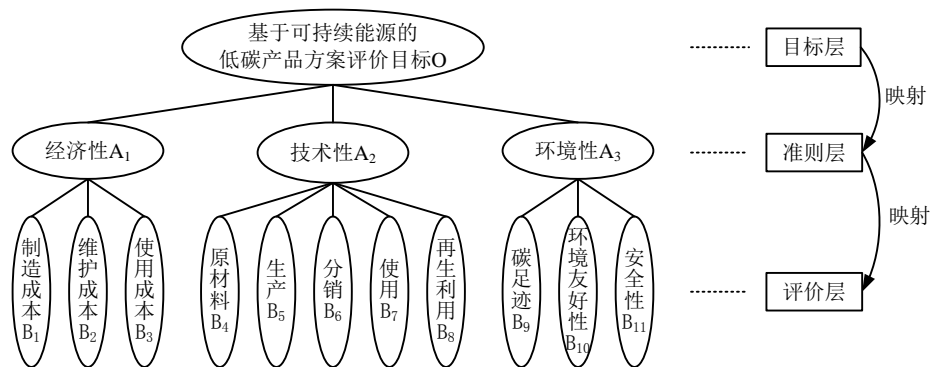


Figure 2. Evaluation tree of Low-carbon products for Sustainable energy

图 2. 基于可持续能源的低碳产品方案评价树

较好，6%的认为一般，2%认为较差，1%认为差，0%认为很差，0%认为极差。于是在设计目录中的对应位置依次填入 0.21, 0.29, 0.28, 0.13, 0.06, 0.02, 0.01, 0, 0, 显然该数列之和为 1, 如表 1 所示。从而得到能用于基于可持续能源的低碳产品方案设计评价的设计目录, 表 2 仅列出编号为 68 的设计目录片段。

3.2. 评价项权重求解模块

3.2.1. 建立各层判断矩阵

判断矩阵用于表达针对图 2 中上一层次某因素而言, 本层次的指标与之相关的各指标之间的相对重要性。如图 2 中的目标层 O 与下层次经济性 A₁、技术性 A₂ 和社会性 A₃ 的各因素有关, 则构造判断矩阵 A₀, 如下表 3 所示。其中 a_{ij} 表示对 O 来说, A_j 对 A_i 的相对重要性的数值表示, 通常采用“1-9”标度法 [9] (表 4)。在设计过程中, 设计师根据基于可持续能源的低碳产品设计要求表的具体情况, 确定相对重要度的具体数值。

3.2.2. 求各单一层相对权重

改进的 AHP 方法 [9]-[15] 利用最优传递矩阵的概念, 无需进行一致性检验, 可直接求出权重值, 具体

Table 1. Information integration with evaluation set and design catalogue

表 1. 评价集与设计目录的集成

	极好	很好	好	较好	一般	较差	差	很差	极差
	90	80	70	60	50	40	30	20	10
生产	0.21	0.29	0.28	0.13	0.06	0.02	0.01	0	0
...									

Table 2. Information integration with evaluation set and design catalogue design catalogue (partly)

表 2. 评价集与设计目录的集成设计目录片段

标识项	编号	68	名称								利用风能作为动力源
约束项			略								
主体项			略								
		评语等级	极好	很好	好	较好	一般	较差	差	很差	极差
			90	80	70	60	50	40	30	20	10
	经济性	制造成本 B ₁	0.18	0.24	0.29	0.16	0.08	0.05	0	0	0
		维护成本 B ₂	0	0.27	0.23	0.16	0.12	0.14	0.08	0	0
		使用成本 B ₃	0	0.38	0.33	0.10	0.08	0	0	0.03	0.01
	评价项	原材料 B ₄	0.31	0.16	0.13	0.10	0.08	0.07	0.10	0.05	0
		生产 B ₅	0.23	0.35	0.28	0.07	0.06	0	0.01	0	0
	技术性	分销 B ₆	0	0	0.15	0.08	0.11	0.21	0.34	0.06	0.05
		使用 B ₇	0	0	0	0.06	0.11	0.16	0.24	0.41	0.02
		再生利用 B ₈	0	0	0	0.10	0.23	0.36	0.20	0.06	0.05
		碳足迹 B ₉	0	0.29	0.26	0.24	0.13	0.08	0	0	0
	社会性	环境友好性 B ₁₀	0	0.17	0.20	0.20	0.30	0.08	0	0.03	0.02
		安全性 B ₁₁	0	0.17	0.20	0.17	0.20	0.15	0.06	0.05	0

Table 3. Judgment matrix
表 3. 判断矩阵

O	A ₁	A ₂	A ₃
A ₁	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃
A ₂	a ₂₁	a ₂₂	a ₂₃
A ₃	a ₃₁	a ₃₂	a ₃₃

Table 4. Judgment matrix “1-9” scale method
表 4. 判断矩阵 “1-9” 标度法

标度	标度说明
1	同样重要
2	介于标度 1 和标度 3 之间
3	稍微重要
4	介于标度 3 和标度 5 两者之间
5	明显重要
6	介于标度 5 和标度 7 两者之间
7	强烈重要
8	介于标度 7 和标度 9 两者之间
9	极端重要

方法如下：

1) 先构造 B 矩阵，使得：

$$b_{ij} = \lg a_{ij} \quad \forall i, j \quad (1)$$

2) 构造 C 矩阵，使得：

$$c_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk}) \quad \forall i, j \quad (2)$$

3) 构造 A* 矩阵：

$$a^*_{ij} = 10c_{ij} \quad \forall i, j \quad (3)$$

4) 采用方根法求矩阵 A* 的归一化特征向量，即权重 $W_1 = [a_1, a_2, a_3]$ 。

同理分别求出 A₁ 与下层指标 B₁, B₂, B₃ 之间的相对权重，A₂ 与下层指标 B₄, B₅, B₆, B₇, B₈ 之间的相对权重，A₃ 与下层指标 B₉, B₁₀, B₁₁ 之间的相对权重，分别记为 $W_2 = [b_1, b_2, b_3]$, $W_3 = [b_4, b_5, b_6, b_7, b_8]$, $W_4 = [b_9, b_{10}, b_{11}]$ 。

3.2.3. 总排序计算相对权重

利用同一层次指标中所有层次单排序的结果，就可以计算针对上一层次而言，本层次所有因素重要性的权重，这就是层次总排序。由表 5 得到的也即为各评价项在此次评价中的权重。记为 $Q = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9, q_{10}, q_{11}]$ 。显然，上表中的评价层相对权重之和为 1，即

$$\sum_{i=1}^{11} q_i = 1。$$

Table 5. Hierarchy calculation of the total level
表 5. 层次总排序计算

层次 O	A ₁	A ₂	A ₃	评价层的相对权重
	a ₁	a ₂	a ₃	
B ₁	b ₁	0	0	a ₁ × b ₁ = q ₁
B ₂	b ₂	0	0	a ₁ × b ₂ = q ₂
B ₃	b ₃	0	0	a ₁ × b ₃ = q ₃
B ₄	0	b ₄	0	a ₂ × b ₄ = q ₄
B ₅	0	b ₅	0	a ₂ × b ₅ = q ₅
B ₆	0	b ₆	0	a ₂ × b ₆ = q ₆
B ₇	0	b ₇	0	a ₂ × b ₇ = q ₇
B ₈	0	b ₈	0	a ₂ × b ₈ = q ₈
B ₉	0	0	b ₉	a ₃ × b ₉ = q ₉
B ₁₀	0	0	b ₁₀	a ₃ × b ₁₀ = q ₁₀
B ₁₁	0	0	b ₁₁	a ₃ × b ₁₁ = q ₁₁

3.3. 综合评价模块

3.3.1. 建立模糊评价矩阵

设矩阵 R 表示评价集 U 到评语集 V 的模糊关系，其中 R 中各元素 r_{ij} 表示从第 i 个因素着眼，对被评价项做出第 j 种评语的可能程度。 $(i = 1, 2, \dots, 11; j = 1, 2, 3, \dots, 9)$ ，从而建立 11×9 阶模糊评价矩阵 R 。

3.3.2. 模糊综合评价

对于评价项，采用模糊乘法[14]，得到模糊综合评价结果：

$$B = Q \cdot R \tag{4}$$

经过归一化处理，得到综合评价结果 WQ ，即 $WQ = [wq_1, wq_2, wq_3, wq_4, wq_5, wq_6, wq_7, wq_8, wq_9]$ 。

采用加权平均法确定优先级系数：

$$PRI = \sum_{i=1}^{11} wv_i \times wq_i \tag{5}$$

3.4. 设计师选择模块

对上述得到的优先级系数按大小顺序排序，值越大表示该设计方案越满足低碳设计要求，从而为设计师选取最合适的基于可持续能源的低碳产品方案提供参考依据。若优先级系数相差不大或设计师还想进一步区分低碳设计方案的优先级系数，可再次按上述过程重新求解直至得到满意的基于可持续能源的低碳产品方案。

3.5. 应用

在基于可持续能源的产品低碳设计过程中，有多个低碳设计方案，其编号分别为 101, 26, 58, 20。以编号 101 的设计方案为例，利用上述基于设计目录评价树的多目标加权模糊层次分析法，分别得到如下数据： $W_1 = [0.151, 0.209, 0.640]$, $W_2 = [0.665, 0.155, 0.180]$, $W_3 = [0.127, 0.514, 0.138, 0.150, 0.071]$, $W_4 =$

[0.501, 0.301, 0.198], $Q = [0.100415, 0.023405, 0.02718, 0.026543, 0.107426, 0.028842, 0.03135, 0.014839, 0.32064, 0.19264, 0.12672]$, 综合评价值为 $WQ = [0.117, 0.139, 0.086, 0.091, 0.091, 0.218, 0.017, 0.078, 0.163]$, 最后得到 101 设计方案的优先级系数为 $PRI_{101} = 50.1$ 。类似的, 可以得到 $PRI_{26} = 46.2$, $PRI_{58} = 78.3$, $PRI_{20} = 25.1$ 。因此经过综合评价, 得到 58 号设计方案为最优设计方案。

4. 结论

气候变化问题已经成为可持续发展的重要议题。在低碳经济的号召下, 通过对基于太阳能、风能、水能、沼气能等可持续能源的产品碳足迹的研究, 有助于企业真正地理解碳排放对气候变化的影响, 并采取可行性的措施来减少产品全生命周期中的碳排放。本文针对基于可持续能源的产品设计, 提出了基于设计目录评价树的多目标加权模糊层次分析法, 对各个评价项进行权衡, 全面求得满意解, 并且使得各评价项能够最大限度的相互适应。然后由设计师根据实际情况, 在备选方案中进行择优。因此能够有效地解决低碳设计过程中设计方案的各评价项的综合择优, 实现产品低碳设计的评价决策智能化。

参考文献 (References)

- [1] 百度百科 (2013) 可持续能源. <http://baike.baidu.com/view/2355584.htm>
- [2] 王远亚, 吉威宁, 崔武军, 武洪强, 苑中显 (2013) 近十年来我国能源消费变化及未来发展趋势. *可持续能源*, **3**, 17-21.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change, 447-496.
- [4] United Nations (1998) Kyoto Protocol to the United Nations Framework on Convention on Climate Change.
- [5] BSI PAS 2050 (2011) The Guide to PAS 2050-2011, How to Carbon Your Product Footprint, Identify Hotspots and Reduce Your Emission in the Supply Chain.
- [6] 国务院办公厅 (2009) 国务院常务会研究决定我国控制温室气体排放目标 http://www.gov.cn/jdhd/2009-11/26/content_1474016.htm
- [7] Finkbeiner, M. (2009) Carbon Footprinting-Opportunities and Threats. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **14**, 91-94.
- [8] 郑晓泉 (2011) 未来能源发展战略. *可持续能源*, **1**, 1-5.
- [9] Saaty, T.L. (2013) Analytic Hierarchy Process. In: *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer, 52-64.
- [10] Shaw, K., Shankar, R., Yadav, S.S., et al. (2012) Supplier Selection Using Fuzzy AHP and Fuzzy Multi-Objective Linear Programming for Developing low Carbon Supply Chain. *Expert Systems with Applications*, **39**, 8182-8192.
- [11] 梁瑞勋, 周智帆, 陈一通, 曾万存 (2013) 应用模糊为基础的方法于太阳能光伏系统之最大功率追踪. *可持续能源*, **3**, 45-53.
- [12] Bevilacqua, M., Ciarapica, F.E., Giacchetta, G., et al. (2011) A Carbon Footprint Analysis in the Textile Supply Chain. *International Journal of Sustainable Engineering*, **4**, 24-36.
- [13] Roth, K. (1993) *Konstruieren mit Konstruktionskataloguen*. Springer, Heidelberg.
- [14] 李洪兴, 汪培庄 (1994) 模糊数学. 国防工业出版社, 北京.
- [15] He, B., Han, L.Z., Liu, W.Z., Li, M. and Fang, M.L. (2009) A Computational Evaluation Approach Based on Design Catalogue for Product Conceptual Design and Its Application in Mechanical Transmission System. *Proceedings of the IET International Communication Conference on Wireless Mobile & Computing*, Shanghai, 7-9 December 2009, 306-309.