

面向能量优化的产品设计方案评价方法*

何平^{1,2} 刘光复¹ 周丹¹ 宋守许¹ 吴仲伟¹

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽建筑工业学院机械与电气工程学院, 合肥 230601)

摘要: 在分析产品能量特性评价的基础上,建立了融合经济性和环境性并充分考虑使用过程能耗因素不确定性的产品能量优化性能评估模型。基于产品的使用过程建立了面向能量优化的经济性分析模型和环境性分析模型,分析了在产品使用阶段中影响能量优化的不确定性因素并进行建模分析,得到产品能量优化性能评价价值。然后采用模糊信息公理法对产品设计方案进行评价,获得最优设计方案。以某运输设备减速器为例,验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 产品设计方案 评价方法 能量优化 模糊信息公理

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0219-06

Schemes Evaluation of Product Design for Energy Optimization

He Ping^{1,2} Liu Guangfu¹ Zhou Dan¹ Song Shouxu¹ Wu Zhongwei¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230601, China)

Abstract: Based on the evaluation analysis of the energy characteristics of products, an energy optimization performance assessment model was presented taking into account economical effectiveness, environmental performance and uncertainty of energy consumption factors of use phase. In accordance with using process of energy optimization, the economy analysis model and environment analysis model were established. Uncertainty factors influencing energy optimization were analyzed and modeled during the usage stage. Therefore the evaluation value of energy optimization performance was obtained. Then the product design scheme was evaluated by applying fuzzy information axiom method, and the optimal design scheme was acquired. At last, a product case was given to verify the assessment method.

Key words: Schemes of product design Evaluation method Energy optimization Fuzzy information axiom

引言

我国机械产品能量消耗巨大,且能源利用率偏低,这一问题日益受到人们的重视。进行面向能量优化的产品设计,对于提高能源利用率具有重大意义。产品的方案设计是实现产品设计创新的关键,而设计方案的评价与决策又直接影响到设计后期的结果。因此,对面向能量优化的产品设计方案进行正确评价与可靠决策是产品创新概念设计的一个重要环节。

在针对面向能量优化的产品方案设计的评价方法研究中,研究人员较多单一地从经济性或能量消耗的角度去考虑产品的能量优化性能,而较少综合考虑经济性和环境性因素,并将二者有效统一;同时没有充分考虑产品使用阶段能量优化的动态性和不确定性,即产品的能量优化性能是受产品的使用、维护情况以及社会和技术发展影响的动态指标^[1-7]。本文在现有研究基础上,给出产品能量优化性能定义,将产品能量优化的经济性和环境性融入到产品的设计方案中,建立产品能量优化性能的评估模型,

收稿日期: 2012-03-22 修回日期: 2012-04-12

* 国家自然科学基金资助项目(50775061, 51135004)

作者简介: 何平, 博士生, 安徽建筑工业学院讲师, 主要从事绿色设计研究, E-mail: peace1823@163.com

并分析考虑产品使用过程中影响产品能量优化的不确定性因素,给出产品能量优化性能的量化分析与计算。针对面向能量优化的设计方案评价指标体系,运用模糊信息公理法进行量化评价分析,从而为产品设计方案提供全面、准确和可行的评价决策分析方法。

1 产品能量优化性能的定义

产品能量优化是指产品使用过程中对能量传递和转换效率进行优化的过程,一般包括定量化描述、建模、能量消耗控制要素提取与表达等。产品能量优化性能是对产品的能耗和环境影响可控设计要素的描述。产品的能量优化性能一般受如下因素的影响^[8]:

(1) 产品能量属性的影响:产品结构、材料、工艺、能耗模式等属性直接决定了产品使用阶段能量优化的可行性和节能效益,这也是设计阶段需要解决的主要问题。

(2) 法律法规的影响:产品能量优化的经济效益和环境效益与相关法律法规的规定具有一定的关系,法律法规的约束越严格,能量节约的效益越明显。

(3) 能量优化技术的影响:产品的能量优化以及节能产品的维护都要通过一定的技术手段实现,技术水平的提高必将提高产品能量优化级别与节能效益。

(4) 经济性的影响:产品使用阶段能量节约效益受到经济发展水平与规模效益的影响。

因此,可以将产品能量优化性能定义如下:在一定的社会、经济和技术条件下,产品在使用阶段中进行能量优化的经济效益和环境效益的综合表现。可以表示为

$$E_{OP} = F(C, E) = w_1 C + w_2 E \quad (1)$$

式中 E_{OP} ——产品的能量优化性能

C ——产品能量优化的经济效益评估参数

E ——产品能量优化的环境效益评估参数

w_1, w_2 ——权重系数

2 产品能量优化分析模型

对产品设计方案的能量优化性能进行分析必须基于产品的信息模型。为了支持面向产品能量优化的设计,提出了集成模型、应用模型相结合的建模方法^[9],对产品能量优化应用模型进行描述,作为能量优化分析的基础。

由于产品能量优化性能主要与产品的材料、结构、能耗模式等因素相关,因此产品能量优化应用模

型主要对这些因素进行描述,为了与实际的产品设计过程相对应,本文提出了设计元的概念。设计元是设计者考虑产品能量要素而设定的产品设计基本单元,根据设计元的设计策略可以分为能量转换元、能量传递元、能量存储元和能量混合元4类。基于设计元的产品能量优化应用模型为

$$S = \{U_D, C_D, dc\}$$

其中, $U_D = \{U_{di} | i \leq M\}$ 为设计元集合, $U_{Di} = \langle n_i, I_{Pi}, I_{Efi}, R_i, E_{Ci}, P_{Ei} \rangle$, U_{Di} 为设计元, n_i 为设计元中的零件数, I_{Pi} 为设计元中的零件集, I_{Efi} 为设计元中的能量设计因子集, R_i 为设计元中的零部件约束关系集合, E_{Ci} 为设计元的能量优化级别,这里主要考虑能量转换、能量传递、能量存储和能量混合, P_{Ei} 为设计元的能量优化处理工艺。 $C_D = \{c_{di} | i \leq N\}$ 为设计元约束集合。 $dc: U_D \leftrightarrow C_D$, 为设计元集合和设计元约束集合的映射关系。 M 为产品中设计元的个数; N 为产品中设计元约束个数,基于该模型进行如图1所示的面向能量优化的产品设计方案评价分析。

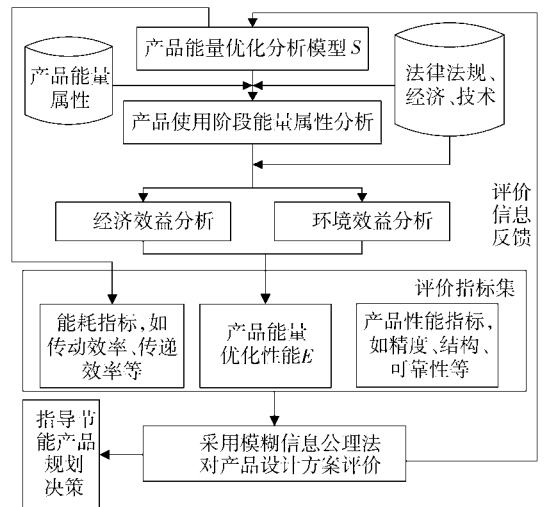


图1 面向能量优化的产品设计方案评价过程框图

Fig.1 Evaluation process of product design scheme for energy optimization

3 产品能量优化性能评价确定过程

3.1 面向能量优化的经济性分析

能量节约产品的经济性是产品进行能量优化的直接驱动力,因此面向能量优化的经济性是产品节能性的重要衡量指标之一。能量优化后的产品使用过程中的主要经济因素为:

(1) 产品制造装配费用:指根据设计元思想对可以节能的特殊零件制造与装配的费用,这里主要考虑技术成本和工艺成本。

(2) 节能收益:指能量转换和能量传递过程中的能源节约收益。

(3) 能量回收收益:指产品能量存储系统对能量回收再使用而获得的能源节约收益。

(4) 产品维护成本:指对不同能耗模式的设计元在串行或并行能量流结构中进行维护处理的费用和对能量混合元中能量分配进行处理的费用。

能量优化产品的经济效益可表示为

$$C(S) = P_{ES}(S) + P_{ER}(S) - C_{MA}(S) - C_M(S) \quad (2)$$

其中 $P_{ES}(S) = \sum_{i=1}^m P_{ESi}$ $P_{ER}(S) = \sum_{i=1}^n P_{ERi}$

$$C_{MA}(S) = \sum_{i=1}^v C_{MAi} \quad C_M(S) = \sum_{i=1}^p C_{Mi}$$

式中 $P_{ES}(S)$ ——产品 S 中能量转换元和能量传递元的收益

m ——能量转换元和能量传递元的个数

$P_{ER}(S)$ ——产品 S 中能量存储元的收益

n ——能量存储元个数

$C_{MA}(S)$ ——产品 S 中特殊零件的制造与装配的费用

v ——特殊技术处理的工艺步数

$C_M(S)$ ——产品 S 使用过程中维护的费用

p ——维护处理的次数

为了衡量产品面向能量优化的经济性,需要建立一个具有相对意义的衡量指标。根据理想点与负理想点的概念,建立评估指标——产品能量优化经济性因子

$$C = \frac{C(S) - C_-(S)}{C_+(S) - C_-(S)} \quad (3)$$

其中, $C_+(S)$ 表示产品 S 能量优化后的理想节能效益,比如能量转换与传递的效率可达到理想状态值或是能量存储附加值; $C_-(S)$ 表示产品 S 未经过能量优化的能源使用经济效益,即能源有效使用获得的产出值与能源成本的差额。

3.2 面向能量优化的环境性分析

能量优化后的产品使用过程中对环境的影响主要考虑产品使用和维护过程中产生的环境影响和使用带来的间接环境影响。主要包括:

(1) 产品使用过程中产生的环境影响主要是产品使用中产生有毒有害物质排放的环境影响,包括有害气体、液体、噪声和电磁辐射等产生的环境影响。

(2) 使用中的产品部分零部件损坏后维护处理产生的环境影响。

(3) 产品使用中能量无效部分间接产生的环境影响。

为了方便量化环境影响,基于设计元和 EI99 (Eco-Indicator99) 系统^[10]进行环境因素的计算,公式为

$$E(S) = \sum_{i=1}^{M_s} G_i \left(\sum_{j=1}^{N_s} V_{ij} r_{vij} + M_i r_{mi} + I_i r_{ii} \right) \quad (4)$$

式中 M_s ——产品 S 中的设计元数

G_i ——第 i 个设计元的能量优化级别效用价值
 V_{ij} ——第 i 个设计元经过第 j 种能量优化处理工艺后使用所产生的环境影响

r_{vij} ——第 i 个设计元经过第 j 种能量优化处理工艺后的能量优化级别效用价值比例

M_i ——第 i 个设计元维护处理产生的环境影响

r_{mi} ——第 i 个设计元经过维护处理后的能量优化级别效用价值比例

I_i ——第 i 个设计元中能量无效部分转换产生的环境影响(计算取负值)

r_{ii} ——第 i 个设计元能量无效部分的能量优化级别效用价值比例

同经济性评估相同,建立产品能量优化环境影响因子

$$E = \frac{E_-(S) - E(S)}{E_-(S) - E_+(S)} \quad (5)$$

其中, $E_+(S)$ 为产品 S 能量优化处理后环境影响的正理想值,代表了产品使用过程中完全不带来环境影响的理想情况; $E_-(S)$ 为产品 S 能量优化处理后环境影响的负理想值,代表了产品使用过程中所带来环境影响程度最大化的情况。

3.3 不确定性分析

产品从使用到报废经历了一定的寿命跨度,产品的能量可控性受到这一时间内产品的使用情况、相关维护技术和社会因素的影响,因此存在一定的不确定性。这些影响因素在第 1 节已经讨论,下面分析这些因素对产品能量优化性能的影响。为了方便分析,将这些因素进一步细化,如表 1 所示。

表 1 考虑的影响因素

Tab. 1 Effecting factors

影响因素	描述
使用状态 F_1	产品使用过程中由操作者决定的使用状态
能源价格 F_2	能源价格的的增长,使产品能量优化性能提高
节能价值 F_3	消费者节能意识的提高,使产品能量优化的价值提高
环境标准 F_4	环境标准的提高使产品能量优化的环境效益提高,同时可能暂时降低经济效益
节能技术 F_5	节能技术的改善使能量优化过程经济效益提高,环境效益也提高

表 1 所示影响因素的发生都具有不确定性,其设计范围与评价指标均为定性描述。参照文献[11]介绍的模糊贝叶斯决策方法,建立不确定性分析模型:

影响因素集 $F = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5\}$

权重集 $W = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5\}$

状态等级集 $S_j = \{\text{好, 一般, 差}\}$

状态矩阵 $S = [s_{ij}]_{5 \times 3}$

其中 s_{ij} 为第 i 个影响因素的第 j 种可能状态。

目标因素集 $O = \{C, E\}$, 表示分析的目标因素。

若用 $P(s_{ij})$ 表示状态 s_{ij} 的发生概率, 用 $G_C(s_{ij})$ 和 $G_E(s_{ij})$ 分别表示对分析目标 C 和 E 的效用值(这里用对产品整体能量优化性能的影响比例表示, 一般由专家经验给出), 则可以得到所分析因素对能量优化经济性因子和能量优化环境影响因子的影响分别为

$$w_C = \sum_{i=1}^5 w_i \left(\sum_{j=1}^3 G_C(s_{ij}) P(s_{ij}) \right) \quad (6)$$

$$w_E = \sum_{i=1}^5 w_i \left(\sum_{j=1}^3 G_E(s_{ij}) P(s_{ij}) \right) \quad (7)$$

因此, 最终产品的能量优化性能表示为

$$E_{OP} = F(C, E) = w_1(1 + w_C)C + w_2(1 + w_E)E$$

4 模糊信息公理评价

采用模糊信息公理对产品方案进行评价时, 信息量作为统一的衡量尺度, 表达了对各设计方案的满意程度^[12]。评价过程中, 不需要给出各评价指标的相对权重, 而是根据设计者本身的意图给出各指标适当的设计范围, 通过与实际工作中的系统范围发生联系计算信息量。设计者的意图和赋予每个评价指标的重要性可以由设计范围体现, 设计范围越大, 则说明该指标对于设计方案越不重要。因此, 如果能够给所有设计指标一个精确的设计范围, 那么各指标的重要程度自然很清晰地表现出来。相对于其他基于权重的评价方法, 整个计算过程比较简单。

对于包含定量和定性指标体系而言, 指标信息量的计算可通过以下两种公式计算。

(1) 当设计范围和评价指标均为定量表达时, 信息量计算公式为

$$I_i = \text{lb} e^{|y_i - y_0|} \quad (8)$$

式中 y_0 ——满足功能要求需要达到的值

y_i ——第 i 个设计方案达到的值

(2) 当设计范围和评价指标均为定性描述时, 定义设计范围的隶属函数曲线所围成的面积为模糊设计范围, 定义系统范围的隶属函数曲线围成的面积为模糊系统范围, 定义模糊设计范围与模糊系统范围相交的部分为模糊公共范围。此时, 信息量计算公式为

$$I_i = -\text{lb} \frac{G_i}{X_i} \quad (9)$$

式中 G_i ——模糊公共范围

X_i ——模糊系统范围

按式(8)、(9)计算出各设计方案中各评价指标的信息量, 然后计算出各设计方案的总信息量^[13-14]为

$$I_E = \sum_{i=1}^u I_i \quad (10)$$

式中 u ——评价指标个数

通过比较各设计方案总信息量的大小, 选择总信息量最小的方案为最佳设计。

5 应用实例

5.1 实例求解

为了验证所提出方法的可行性, 利用提出的评价方法对某运输设备减速器的机械传动方案进行评价分析。减速器工作条件要求是输送带工作拉力不超过 6 kN, 带速小于 1 m/s, 设计 requirements 是减速大功率传动、传动效率高、传动平稳、结构紧凑、能量优化性能高。本文对于该设备减速器的运动转换机构, 提供 3 种可选方案: 方案 1 为两级展开式圆柱齿轮减速器; 方案 2 为两级展开式圆锥-斜齿圆柱齿轮减速器; 方案 3 为单级蜗杆减速器。3 种减速器的设计方案简图分别如图 2~4 所示。

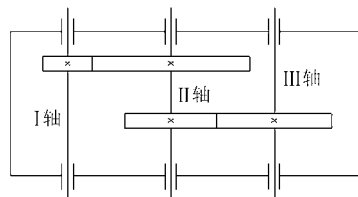


图 2 两级圆柱齿轮减速器设计方案简图

Fig. 2 Design program of two-stage helical cylindrical gear reducer

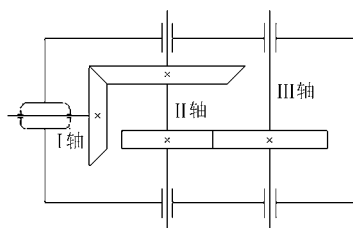


图 3 两级圆锥-斜齿圆柱齿轮减速器设计方案简图

Fig. 3 Design program of two-stage helical cone-cylindrical gear reducer

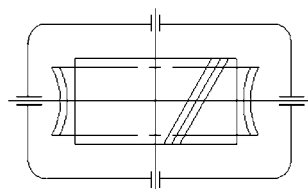


图 4 单级蜗杆减速器设计方案简图

Fig. 4 Design program of single-stage worm gear reducer

基于对减速器的分析和相关实验^[8-10], 根据提出的产品能量优化性能评价求解方法, 可以得到如表 2 所示的评价结果数据。其中, 产品使用过程中的经济指标数据由节能优化处理工艺数据、能源价格和维护成本及能效比例等数据(由于我国对产品使用阶段能量优化的基础理论研究和应用还不够深入, 因此在评价分析过程中减速器的能量转换、传递与存储方面的经济效益值借鉴了欧洲的分析数据)统计和计算而获得; 环境影响指标数据基于设计、使用过程参数与 EI99 系统数据得到, 单位用 millipoints(mPt)表示; 在进行产

品能量优化性能评价过程中不确定性分析的数据如表 3 所示, 3 种设计方案的权重值设定统一, 因素集 F 中因素的状态根据对国内外文献的综合、统计与分析确定, 不同状态对能量优化过程的经济和环境的效用值采用德尔菲调查法向本领域专家调查得到, 利用式 (6)、(7)对表 3 的基础数据进行计算, 可以获得表 2 中经济性不确定因子和环境影响不确定因子的值。由于本文重点考虑能量优化性能参数进行产品方案综合评价分析, 所以经济性评估参数与环境效益评估参数的权重分别设定为 0.4 和 0.6。

表 2 减速器 3 种设计方案的能量优化性能评估结果

Tab. 2 Energy optimization performance assessment results of three design schemes of mechanical driven system

方案	经济 效益 /元	环境 影响值 /mPt	理想经 济效益 /元	普通经 济效益 /元	环境影响 正理想值 /mPt	环境影响 负理想值 /mPt	能量优 化经济 性因子	能量优化 环境性 因子	经济性 不确定 因子	环境影响 不确定 因子	能量优 化性能 评价值
1	28 70.5	-5 172.0	7 200	-90.5	-9 985.0	7 204.5	0.406	0.720	0.041	0.019	0.609
2	2 650.0	-4 934.5	7 150	-132.5	-9 868.5	6 940.5	0.382	0.700	0.050	0.018	0.580
3	2 334.5	-4 212.5	6 850	-165.0	-8 420.5	6 210.5	0.356	0.712	0.044	0.036	0.591

表 3 减速器 3 种设计方案的 uncertain 因素分析

Tab. 3 Uncertainty factors analysis of three design schemes of mechanical driven system

影响因素	权重	状态	概率			经济性效用			环境性效用		
			方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3	方案 1	方案 2	方案 3
使用状态	0.10	基本按说明要求正常使用	50	50	50	0	0	0	0	0	0
		没有完全按说明要求使用	40	40	40	-5	-10	-15	-5	-5	-5
		使用中出現多次严重误操作	10	10	10	-10	-20	-25	-10	-15	-20
能源价格	0.20	涨幅 10% 以内	50	50	50	10	15	20	0	0	0
		涨幅 10% 以上	40	40	40	20	25	30	0	0	0
		基本不变	10	10	10	10	15	20	0	0	0
节能价值	0.12	贬值 20% 以内	50	40	40	0	-5	-10	0	0	0
		贬值 20% 以上	40	40	40	-5	-10	-15	0	0	0
		基本不变	40	45	50	0	0	0	0	0	0
环境标准	0.25	提高 5% 以内	40	40	40	-5	-5	-5	0	0	5
		提高 10% 以内	20	10	5	-10	-15	-30	7	7	14
		基本不变	10	10	15	0	0	0	20	7	7
节能技术	0.33	基本不变	20	25	30	0	0	0	0	3	5
		有改进	40	40	45	10	15	15	3	7	7
		有较大改进	30	20	20	25	30	35	10	10	25

减速器机械传动系统的具体评价指标体系如表 4 所示。根据用户需求确定各评价指标的设计范围: 传动精度要达到 0.96 以上; 承载能力要达到 0.96 以上; 传动效率要达到 0.97 以上; 可制造性要达到 0.85 以上; 可靠性要达到较好以上; 传动比范围要达到较好以上; 环境适应性、结构复杂性和减振降噪性等指标均纳入产品能量优化性能, 可以量化表达, 其评价值要达到 0.60 以上。设计范围确定后, 根据各方案能达到的系统范围, 利用基于模糊公理信息计算方法分别计算各指标信息量。为节省篇幅, 此处不给出计算过程, 仅列出最后的信息量计算结果, 如表 5 所示。

表 4 减速器设计评价指标及取值

Tab. 4 Evaluation indicator of decelerator

评价指标	方案 1	方案 2	方案 3
传动精度	0.970	0.980	0.965
承载能力	0.950	0.965	0.980
传动效率	0.900	0.890	0.750
能量优化性能	0.609	0.580	0.591
可制造性	0.900	0.859	0.855
可靠性	好	好	较好
传动比范围	较好	较好	好

5.2 结果分析

由表 5 可以看出, 3 个设计方案中, 方案 1 的总信息量最小, 按照模糊信息公理评价的要求, 方案 1

表5 减速器设计方案评价信息量计算结果

Tab.5 Information content of decelerator

评价指标	方案1	方案2	方案3
传动精度	0.014	0.028	0.007
承载能力	0.014	0.007	0.028
传动效率	0.083	0.118	0.318
能量优化性能	0.013	1.244	0.013
可制造性	0.072	1.000	0.007
可靠性	0.169	0.169	1.169
传动比范围	1.169	1.169	0.169
	$I_{E1} = 1.534$	$I_{E2} = 1.541$	$I_{E3} = 1.711$

为最合理的设计方案。通过对表5计算分析可知,如果不将能量优化性能作为评价指标,则方案2的总信息量最小。之所以产生不同的评价结果,主要是因为将能量优化性能融入产品方案设计中,即将环境适应性、结构复杂性和减振降噪性等指标作为重要评价指标,同时利用能量优化性能量化表达方法将定性指标量化表达,使得计算结果更加精确。通过以上实例分析可以看出,将能量优化性能纳入产品设计方案的评价指标体系,利用模糊信息公理

法进行评价分析,获得的结果是不同的。因此,考虑能量优化性能的产品设计方案可以更为全面地体现产品的性能和满足客户的需求,较好地提高了产品设计方案评价的准确性和全局性。

6 结束语

在设计阶段全面考虑了产品的能量属性,并提出产品能量属性的优化性能定义,从经济性和环境性两个角度来衡量产品的能量优化性能,分别建立评价模型,给出了量化公式,弥补了以往设计中只重视产品的结构、功能和成本而较少考虑产品绿色性能或是即使考虑绿色性能却多以定性描述为主的不足。将产品能量优化性能扩充到产品设计方案评价指标体系中,运用模糊信息公理法对面向能量优化的设计方案进行量化评价。以减速器的设计方案为例,对3种设计方案进行比较分析,并进行方案优选。最终实例验证了考虑能量属性的评价方法的可行性和有效性。

参 考 文 献

- Peder E F, Joyce S C. Life cycle energy analysis as a method for material selection[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2004, 126:798 ~ 804.
- Chalkley A M, Billett E, Harrison D, et al. Development of a method for calculating the environmentally optimum lifespan of electrical household products [J]. Journal of Engineering Manufacture, 2003, 217(11):1521 ~ 1531.
- Kim H C, Keoleian G A, Horie Y A. Optimal household refrigerator replacement policy for life cycle energy, greenhouse gas emissions, and cost [J]. Energy Policy, 2006, 34(15):2310 ~ 2323.
- Zora Ayhan, Fahmy Mohammed F, Pecun Recayi, et al. A comprehensive energy model development for off-highway vehicles[C] //2005 ASEE Annual Conference and Exposition: The Changing Landscape of Engineering and Technology Education in a Global World, Portland, OR, ASEE, 2005:2037 ~ 2047.
- Banjac Titina, Trenc Ferdinand, Katrašnik Tomaz. Energy conversion efficiency of hybrid electric heavy-duty vehicles operating according to diverse drive cycles [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(12):2865 ~ 2878.
- Katrašnik, Tomaz. Energy conversion phenomena in plug-in hybrid-electric vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(7):2637 ~ 2650.
- Zhang H C, Li H. An energy factor based systematic approach to energy-saving product design[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2010, 59(1):183 ~ 186.
- Christian Condevaux-Lanloy, Emmanuel Fragniere. An approach to deal with uncertainty in energy and environmental planning: the MARKAL case[J]. Environmental Modeling and Assessment, 2000, 5(3):145 ~ 155.
- 江吉彬. 绿色机电产品集成化开发系统建模技术与应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2003.
Jiang Jibin. Study on modeling technology and application of integrated development system of green mechatronic product[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2003. (in Chinese)
- Goedkoop Mark, Eftting Suzanne, Collignon Marcel. The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment: manual for designers[M]. PRé, Product Ecology Consultants, 2000.
- 董志强, 顾昌耀. 线性回归模型的贝叶斯决策方法[J]. 北京航空航天大学学报, 1994, 20(3):229 ~ 234.
Dong Zhiqiang, Gu Changyao. The Bayes decision method for solving the linear regression models [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1994, 20(3):229 ~ 234. (in Chinese)
- 田启华, 肖人彬, 钟毅芳, 等. 基于信息公理和模糊数学的设计方案评价方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12):136 ~ 140.
Tian Qihua, Xiao Renbin, Zhong Yifang, et al. Evaluation schemes method for design based on information axiom and fuzzy mathematics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12):136 ~ 140. (in Chinese)
- 朱龙英, 朱如鹏, 刘正坝. 基于信息公理的产品设计方案评价方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(3):386 ~ 390.
Zhu Longying, Zhu Rupeng, Liu Zhengxun. Evaluation method for product design schemes based on information axiom [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 37(3):386 ~ 390. (in Chinese)
- Suh N P. 公理设计——发展与应用[M]. 谢友柏, 袁小阳, 徐华, 等, 译. 北京:机械工业出版社, 2004.