

# LCA改进QFDE的食品和包装机械生态设计

戴宏民

(重庆工商大学 绿色包装研究所, 重庆 400067)

**摘 要:** QFDE 是一种流程合理、可执行性强的绿色设计方法, 但因缺乏科学的环境影响评价指标及方法, 以及采用定性分配权重, 故难于寻求产品和生产工艺生态特性的改进。使用重视环境影响评价的 LCA 对 QFDE 进行改进, 能改善 QFDE 对环境的影响评价的不足, 成为符合 EuP 生态设计需要、优化产品生态环境特性的生态设计方法。在介绍了 QFDE 的概念, 并对其流程和不足以及 LCA 的生态环境影响指标进行详细分析的基础上, 探讨了采用 LCA 改进后的 QFDE 进行食品和包装机械生态设计的方法、步骤及举措。

**关键词:** 食品和包装机械; 生态设计; 生命周期评价; 卫生设计

**中图分类号:** TB488

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2014)02-0022-05

## Ecological Design of QFDE Improved from LCA in Food and Packaging Machinery

Dai Hongmin

(Green Packaging Institute, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** QFDE is a highly executable green design approach with reasonable procedures. Due to the lack of scientific environmental impact evaluation index and qualitative weight distribution, it is difficult to achieve the improvement in products and ecological characteristics of production processes. Improvement in QFDE was made by using LCA which laid emphasis on environmental impact evaluation. The deficiency in environmental impact evaluation was compensated and it has become the ecological design method in accordance with EuP eco design and with optimized product ecological environment characteristics. After introducing QFDE concept, based on its process and shortcomings, with the detailed analysis of LCA environmental impact assessment, the approach, procedure and measures were discussed with the application in food and packaging machinery by using QFDE improved from the LCA method.

**Key words:** food and packaging machinery; ecological design; life cycle assessment; sanitary design

### 1 背景知识

欧盟颁布的《用能产品生态设计框架指令》(Energy-using Products, EuP)有效推动了机电产品的生态设计。产品生态设计的核心是在生命周期全过程中节约能源和减少对环境的排放。由于产品的能效及对环境的影响取决于产品的设计源头, 因此,

对产品实施生态设计即抓住了保护生态环境的根本。虽然目前 EuP 尚未对食品和包装机械提出实施生态设计的具体措施要求, 但应积极准备, 以适应世界的环保发展趋势。

EuP 生态设计的实施分为一般要求和特殊要求。一般生态设计要求为指定性的环保指标, 不对具体

收稿日期: 2013-09-18

基金项目: 重庆市教委科技研究基金资助项目(KJ100710)

作者简介: 戴宏民(1939-), 男, 重庆人, 重庆工商大学教授, 主要从事绿色包装工程方面的研究,

E-mail: Daihm812@126.com

数值作出限值规定。其包括生命周期全过程中能源与资源之预期消耗量；对空气/水体/土壤之预期污染物排放量，如空气污染物排放、水污染物排放、固体废弃物排放、金属微粒排放等；噪音/震动/辐射等可能造成的污染；废弃物预期产生量；资源/能源回收与再利用之可行性等。特殊生态设计要求则是针对某些重要的环境影响指标，提出可量化/可量测的生态化设计规定，目前主要是能效要求（能源投入/绩效产出）<sup>[1]</sup>。为保证食品安全，食品和包装机械在考虑生态设计的同时，还需要考虑其安全卫生性能，使有害化学物质和细菌滋长量达到“安全卫生规定”的要求。

生态设计的常用工具为面向环境的质量功能配置(quality function deployment for environment, QFDE)和生命周期评价(life cycle assessment, LCA)。QFDE是一种以质量屋关系矩阵为基本工具，将客户和环境的需求多层次转化，配置为产品设计技术特性和质量控制要求（包括产品规划、零部件特性、工艺要求、生产要求）的绿色设计方法。LCA由目标范围界定、清单分析、影响评价、结果解释4部分组成，是目前评价产品资源环境性能、建立生态环境影响指标最具权威性的方法。使用LCA法对QFDE法进行改进，扬优抑弱，则会成为最能符合EuP生态设计需要、有效改善产品生态环境特性、保证产品质量功能的生态设计方法。

本文将以生态设计的一般要求、特殊要求及卫生要求为目标，采用LCA对QFDE改进后的方法，探讨食品和包装机械生态设计的工具、步骤和应采取的主要举措。

## 2 QFDE 设计

### 2.1 QFDE 设计的概念

严格说来，QFDE是一种管理思想、一种产品开发管理和质量保证与改进的方法论，目前已成为机电产品常用的绿色设计方法。它利用直观的质量屋关系矩阵（见图1），通过专家系统或数学方法求得相对权重，从产品需求域到工程域再到物理域的映射展开，将客户和环境对产品质量的需求一步一步地分解，并配置到产品开发的各个过程中。即客户和环境需求→产品工程特征→产品零件构成及关键零件特征→关键零件的工艺特征→关键工艺及质量控制参数，共需构建保证产品开发质量的4个质量屋关系矩阵。在四阶段关系矩阵展开过程中，上一步的输出（相对权重）即是下一步的输入<sup>[2]</sup>。图2所示

是QFDE的四层次分解配置模型<sup>[3]</sup>。

需求		产品特性					
客户需求	权重	1	2	3	4	...	$n_p$
客户需求1		$r_{11}$	$r_{12}$	$r_{13}$	$r_{14}$	...	$r_{1n_p}$
客户需求2		$r_{21}$	$r_{22}$	$r_{23}$	$r_{24}$	...	$r_{2n_p}$
客户需求3		$r_{31}$	$r_{32}$	$r_{33}$	$r_{34}$	...	$r_{3n_p}$
⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
客户需求 $n_c$		$r_{nc1}$	$r_{nc2}$	$r_{nc3}$	$r_{nc4}$	...	$r_{ncn_p}$
绝对权重							
相对权重							

图1 质量屋关系矩阵

Fig. 1 The house of quality matrix

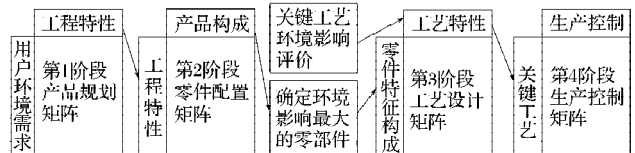


图2 QFDE的四层次分解配置模型

Fig. 2 Configuration model of QFDE four level decomposition

### 2.2 QFDE 设计流程

QFDE的设计流程可分为如下4个阶段。

第一阶段，将客户和环境的需求转换为产品工程特性。

通过产品规划矩阵，将客户和环境的需求（如功能、寿命、价格，无泄漏、低噪音、耗料少，卫生要求等）转换成为质量屋上方的产品工程特性（即技术性能，如最高速度、使用寿命、平均无故障时间、密封性能、噪音频率、规格尺寸、预计价格等）。由于客户和环境需求往往有不同类型、不同量纲，为比较其重要性，可先用模糊优先规划法求出各自的权重。

第二阶段，设计产品结构。

通过零件配置矩阵，将工程特征转换成为产品零件构成，并在完成产品初步设计方案后获得质量屋上方的关键零件特征（如零件的硬度、强度、精度要求和材料要求等）。

第三阶段，确定关键零件和工艺特征。

通过专家系统的权重分配，确定对技术性能和环境影响最大的关键零件。并针对关键零件特征，选择其加工工艺方法和设计工艺流程。依据各工艺方法面向环境的权重分配，即可构建从零件特征到工艺特征的面向环境的工艺设计质量屋。从而获得质量屋上方对环境影响最大的关键工艺特征，如车削、铣削、调质、磨削等。

第四阶段,改进产品和生产工艺生态环境特性。

以对环境影响最大的工艺特征为输入,通过工艺/质量矩阵,进行生产过程控制的质量展开(如控制方法、品保手段、改进方法等),保证产品在整个制造过程的性能和环境要求。

### 2.3 QFDE 应用于生态设计存在的不足

相较 LCA 而言, QFDE 应用于生态设计存在以下不足:

1) 对产品的环境影响依靠定性评价,即对环境影响最大的零部件和关键工艺均是依靠专家系统定性通过权重来分配,因而和实际存在的环境影响值存在较大的误差。

2) QFDE 对生态环境影响指标的表征较粗糙,加之定性评价环境影响值存在较大误差,因而影响了产品和生产工艺生态特性改进举措的全面性。

3) QFDE 对环境要素的考虑主要在生产制造阶段,对 EuP 在生命周期全过程实施生态设计的要求尚有差距。

## 3 LCA 评价产品环境性能的优势

QFDE 应用于产品生态设计,在强调从生命周期全过程量化评价产品环境性能上存在的不足正好是 LCA 的优势。LCA 建立了包括生态健康、人类健康和资源消耗 3 个方面、16 类生态环境影响指标(见表 1)。它通过清单分析,收集了生命周期各阶段的资源、能源消耗和向环境排放“三废”的数据;在此基础上,通过分类、特征化、量化“三步走”模型,对产品全部输入输出数据可能产生的生态环境影响进行定量化评价。据此就可发现产品产生污染最严重的阶段、工序、零部件和污染最严重的生态参数,从而有针对性地寻找改善污染最严重的工序、零部件和生态参数、提高产品资源性能的机会,确保产品达到相应环保指标和 EuP 生态设计实施措施的要求。

表 1 LCA 环境影响类型

Table 1 Impact type of LCA

资源消耗	生态健康	人类健康
可再生资源的使 用或破坏、能 量、固体废弃 物、填埋空间	全球变暖、臭 氧层破坏、光 化学烟雾、酸 化、大气质量 、水体富营养 化、COD 和 TSS	慢性职业健康影响、 慢性公众健康影响、 恶臭等官感影响、 水生生态毒性、陆生 生态毒性

## 4 改进的生态设计步骤和举措

采用 LCA 改进 QFDE 法的食品和包装机械的生态

设计,遵循 QFDE 重视质量保证、逐次将客户需求转化为产品技术特性的四阶段设计流程;而用 LCA 着重对其第三、四阶段进行环境影响量化评价,以提高产品和生产工艺生态特性。

### 4.1 产品工程特性的规划

按 QFDE 设计方法中第一阶段的要求与方法,进行产品工程特性规划。

第一阶段主要是将客户和环境的需求转换为产品的工程特性。此处客户和环境的需求除了客户提出的产品要求之外,还需要满足食品和包装机械特有的安全卫生性能,以及 EuP 对食品和包装机械提出的一般和特殊生态设计的环境要求。为了能分清上述需求的相对重要性,可以用模糊优先规划法求出各自的权重。

### 4.2 产品结构的设计

按 QFDE 设计方法中第二阶段的要求与方法,进行产品结构设计。这一阶段的主要任务是完成产品零件构成,并在完成初步设计方案后,获得关键零件的物理、工艺、环境、卫生特征。本阶段在原材料选用和结构设计时应采取如下举措:

1) 食品和包装机械的原材料主体是金属,为此,应选用可薄型化而又有足够强度和刚度的材料,并应易于回收再利用。

2) 使用的其它包装材料,如陶瓷、塑料以及纸等,凡含铅、镉、汞和六价铬等有害物质,及氯乙烯单体、多氯联苯、偶氮及挥发性有机物等,则在生产中排放时会对环境产生严重的负面影响,故需要换用合适的代用材料,如可以用安全的聚对苯二甲酸乙二酯(poly(ethylene terephthalate), PET)替代聚氯乙烯(poly(vinyl chloride), PVC),用聚丙烯(polypropylene, PP)替代聚苯乙烯(polystyrene, PS),用氧化法漂白的包装用纸替代含氯物质漂白的,并尽量采用不破坏生态的快速林造纸。

3) 为保证卫生性能,需避免机械和包装材料、镀(涂)层上的有害化学物质向被包装食品“迁移”,尤其是在加热状态下更易发生有害化学物质迁移。故材料中有害成份含量必须在限定范围内,其潜在的迁移值必须符合对总迁移极限和特定迁移极限的规定。包装材料上使用的油墨、黏结剂、涂料中的有害成份也易迁移,故也必须是环保型的。

4) 为避免结构设计不合理而导致细菌滋长,凡与食品接触表面的结构材料均应耐热、耐磨、耐腐蚀,无吸收性,易于清洗和消毒;机械及零部件的构造应尽量避免凹坑、折痕、断裂、裂缝等缺陷,以适应在线清洗方式;输送管道和连接部分不应有凹

陷或死角,避免滞留食品;提高自动化程度,避免人工操作。

5) 为了便于设备维修以及废弃后的包装物的回收再利用,产品宜采用可拆卸式和模块式结构设计方法。

### 4.3 关键零件和工艺的确定

利用 LCA 改进 QFDE 设计方法的第三阶段,用量化法确定对环境影响最大的关键零件和关键工艺特征。

采用 LCA 的商用软件,如 Boustead 4.2, Simapro Ver.4.0, GaBi 等,对产品进行生态辨识和生态诊断,也即使用清单分析和影响评价的程序及数据库,对产品在生命周期全过程中(EuP 规定应包括原材料选择和使用阶段,产品制造阶段,产品包装、运输和销售阶段,产品安装和维护阶段,产品使用阶段,废弃及回收阶段等 6 个阶段)影响生态环境的环境干扰因子及影响大小、造成的主要环境问题及总环境影响潜值进行定量化识别。

如没有适合使用的 LCA 软件(主要是数据库中清单数据不适合),则需由企业对产品建立生态档案,即对产品在整个生命周期的投入与排放的生态参数进行量化,并且列表记载。包括产品(或零部件)在各阶段、各工序的能源资源消耗数量、对外排放“三废”环境干扰因子(包括噪声)的种类及数量等。然后依据产品生态档案的投入排放数据,对产品和生产工艺进行影响评价,利用“三步走”模型量化计算可能造成的主要环境问题(见表 1)及总环境影响潜值。最后,可以据此分析确定产品中消耗能源资源严重、对外排放“三废”污染多、对环境影响最大的零部件,分析确定能耗大、资源消耗多、“三废”严重、对环境影响最大的阶段及工序。当存在多个工艺方案时,还可以通过比较,确定环境性能最佳的工艺方案。

### 4.4 产品和生产工艺生态环境特性的改进

利用 LCA 改进 QFDE 设计方法的第四阶段,提高产品和生产工艺的生态环境特性。

产品和生产工艺经过影响评价后,对照 EuP 对食品和包装机械生态设计的一般和特殊实施要求、卫生标准以及有关环保标准,凡生态环境及有关参数未达到要求的,就需改进设计。改进方案也需再次进行生命周期评价,评价后的结果若达到要求,则完成生态设计;若仍未达到要求则需继续改进,直到达到产品生态设计实施措施和其它要求为止。

提高产品和生产工艺的生态环境特性,可以从节能降耗、原材料选用、实施清洁工艺 3 方面采取如

图 3 所示的控制措施。

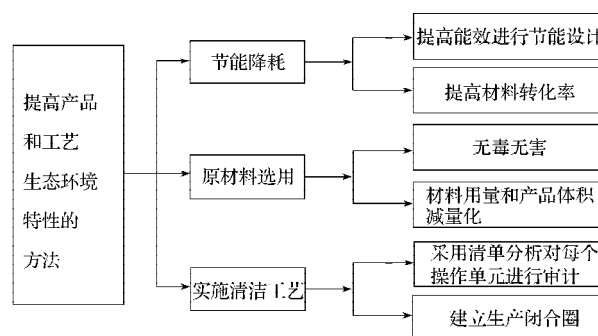


图 3 提高产品和生产工艺生态环境特性的控制方法

Fig. 3 Control method of improving products and ecological environment process characteristics

#### 4.4.1 节能降耗

##### 1) 提高能效

能源和资源消耗,尤其是前者,是产生“三废”污染的根本原因。减量化设计、可拆卸设计和可回收性设计均可节约能源资源,但从提高产品能效出发进行节能设计对降低能耗最为直接有效。如在食品和包装机械的各种功能中,主轴、冷却单元、冷却液、伺服驱动、液压 5 个主要分系统耗用了 88% 的电力,为此,可从减少待机、空转、加工能耗等方面提高机床能效。其途径有:合理地确定各数控轴的电动机类型和功率;选用高能效的液压和气动装置;提高加工过程的效率;借助人机过程,提高机床的易操作性;采用 LED 照明;采用节省能源的冷却装置等<sup>[4]</sup>。EuP 高度重视提高能效,将衡量能耗水平的能效指数(energy efficiency index, EEI)作为所有家电生态设计的特殊实施要求<sup>[5-7]</sup>。

##### 2) 提高材料的转化率

材料的转化率即产出投入比,该比率越低,表明资源浪费越严重,成本越高;相反,所使用的技术手段和设备效率越先进,工艺水平越高,转化率就会越高。

#### 4.4.2 原材料选用

1) 成份无毒无害。原材料成份与对环境的污染和人体的伤害关系很大。因此,原材料的选用应以无毒无害为首要原则,必要时可用安全的材料取代,或用物理、化学方法改善其有害性能。

2) 材料用量和产品体积减量化。产品结构设计时,可通过轻量化、薄壁化设计以减少原材料的用量,通过改变产品形状、优化产品结构以减少产品的体积,从而实施用料减量化。从源头上节能、降耗、减排,是生态设计的首选原则。

#### 4.4.3 实施清洁工艺

实施清洁工艺有如下两个关键:

1) 采用清单分析对每个操作单元进行审计。审计程序为: 绘制产品零件工艺流程图, 列出工艺流程中每一操作单元的名称和功能; 测算每一操作单元的物料和能量平衡, 从中确定废弃物的数量、成份、去向; 再依据物质守恒定律, 分析和确定物料和能量损失的原因, 从而对环境影响最大的零件和工艺提出多个改进方案, 再从技术、环境、经济等方面进行评估与筛选, 最终选定最佳方案。

2) 建立生产闭合圈, 回收利用废弃物。对工艺过程中因挥发、沉淀、滴漏或流失的物料要回收, 将其返回工艺流程中, 或经适当的处理后, 作为原材料回收利用; 同时, 对排放的废弃物经处理后也要回收再用或作为其它企业的原料。

## 5 结论

1) QFDE 是一种流程合理、可执行性强的绿色设计方法。但因其缺乏科学的环境影响评价指标及方法, 以及采用定性分配权重, 故难于寻求产品和生产工艺生态特性的改进。使用重视环境影响评价的 LCA 对 QFDE 进行改进 (主要是改进其第三、四阶段), 就能改善 QFDE 对环境影响评价的不足, 成为符合 EuP 生态设计需要、优化产品生态环境特性的生态设计方法。

2) 食品和包装机械对安全卫生性能有很高要求, 由于其卫生设计标准和生态设计实施要求具有交叉和类同处, 故可将二者合在一起进行设计, 需同时满足生态要求、卫生标准和污染物排放标准。

3) 食品和包装机械自动化程度较高, 完成动作较多, 能耗较大。实施生态设计最关键的技术是节能技术、减量化技术和模块化技术。开展节能设计, 提高能效系数和资源转化率十分重要。

### 参考文献:

- [1] 戴宏民, 戴佩燕, 周 均. 产品生态设计的关键技术及设计方法[J]. 包装学报, 2013, 5(2): 43-47.  
Dai Hongmin, Dai Peiyan, Zhou Jun. The Key Technologies and Design Methods of Product Eco-Design[J]. Packaging Journal, 2013, 5(2): 43-47.
- [2] 李牧之. 基于 QFDE 的绿色设计方法及应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2009: 9-14.  
Li Muzhi. Method of Green Design and Application Based on QFDE[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2009: 9-14.
- [3] 陈世杰, 刘志峰, 蒋建平. 基于生命周期评价的生态设计方法[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 35(11): 1456-1460.  
Chen Shijie, Liu Zhifeng, Jiang Jianping. Method of Eco-Design Based on Life Cycle Assessment[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2010, 35(11): 1456-1460.
- [4] 张 曙, 卫汉华, 张炳生. 机床的节能和生态设计: “机床产品创新与设计”专题: 十[J]. 制造技术与机床, 2012(6): 9-12.  
Zhang Shu, Wei Hanhua, Zhang Bingsheng. Energy-Efficiency and Eco-Design of Machine Tools[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2012(6): 9-12.
- [5] 周树华, 张 欢, 潘 洋. 欧盟洗衣机能效通报及中国应对措施[J]. 轻工标准与质量, 2012(2): 40-43, 54.  
Zhou Shuhua, Zhang Huan, Pan Yang. The Washing Machine Energy Bulletin and Chinese Countermeasures[J]. Standard & Quality of Light Industry, 2012(2): 40-43, 54.
- [6] 付志平. 欧盟 EuP 指令冰箱生态设计要求解析[J]. 电器, 2009(11): 63.  
Fu Zhiping. The EU EuP Directive Refrigerator Ecological Design Requirements Analysis[J]. China Appliance, 2009(11): 63.
- [7] 郭 志. 欧盟 EuP 指令电视机生态设计的实施措施解析及应对[J]. 电器, 2009(9): 62-63.  
Guo Zhi. The EU EuP Directive Television Ecological Design Implementation Measure Analysis and Response[J]. China Appliance, 2009(9): 62-63.

