

DOI: 10.3901/JME.2008.09.013

# 产品设计中生命周期评价与生命周期成本的集成与优化\*

邵新宇 邓超 吴军 王丽琴

(华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室 武汉 430074)

**摘要:** 生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)是绿色设计中的产品环境属性的定量评价工具,但LCA的经济和时间代价制约了LCA的企业应用和发展,将LCA与生命周期成本评估(Life cycle costing, LCC)集成优化是解决这一问题的有效途径。在LCA基本架构的基础上提出LCA与LCC集成评价框架,并考虑时间因素,提出基于矩阵的集成评价算法,建立经济属性与环境属性之间的联系。基于集成评价的结果,建立环境与成本的优化模型,并基于并行子空间优化算法(Concurrent subspace optimization, CSSO)进行优化,使综合效益达到最大,实现经济性与环保性的“双赢”,为改善产品设计提供量化依据。实例研究验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 生命周期评价 生命周期成本评估 并行子空间优化算法 绿色设计

**中图分类号:** TP319 X802.3

## Integration and Optimization of Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing for Product Design

SHAO Xinyu DENG Chao WU Jun WANG Liqin

(State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment &amp; Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract:** Life cycle assessment (LCA), as a quantitative assessment tool for environmental performance in green design, is used widely in decision-making of product design. However, apparently, it's not sufficient to make final decision only depending on environmental assessment results for profit-directed organizations. The aim is to propose a methodology for integration of LCA and life cycle costing (LCC). A framework of integration of LCA and LCC is introduced. An inventory analysis algorithm based on matrix is designed to realize to take timing of effects into account in inventory analysis, and a mathematic model integrating environmental and economic performance is set up. Concurrent subspace optimization (CSSO) algorithm is applied to optimize this model so as to achieve the win-win goal of economic and environmental benefit, which provides a quantitative basis for the improvement of initial product design. A case study of type 4135G diesel engine demonstrates the validity of the proposed methodology.

**Key words:** Life cycle assessment Life cycle costing Concurrent subspace optimization Green design

## 0 前言

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)以其定量化的分析评价特性受到广泛的理解和接受,是绿色设计中最有生命力和发展前途的工具之一。但同时,LCA仅作为产品环境属性的评价工具,在支

持企业经营决策时有一定局限性。因为存在于产品制造中的信息流与存在于LCA中的信息流存在差异,甚至发生矛盾,致使LCA与其他产品设计与制造工具难以集成。而且,企业毕竟是一个盈利机构,LCA的实施将涉及许多潜在的不确定的经济因素和时间因素,昂贵的经济代价和时间代价妨碍了LCA在企业中的广泛应用。这些问题严重束缚了LCA的技术进步和广泛应用。LCA与生命周期成本评估(Life cycle costing, LCC)集成就是解决这一问题的途径之一。

\* 国家重点基础研究发展计划(973计划, 2005CB724107)、国家自然科学基金(50705032)和国家高技术研究发展计划(863计划, 2006A A04Z407)资助项目。20070903收到初稿, 20080317收到修改稿

LCC 是基于产品的全生命周期的一种成本研究方法,是指产品从开始酝酿,经过研究、设计、发展、生产、使用一直到最后报废的整个生命周期内所耗费的研究、设计与发展费用、生产费用、使用和保障费用及最后废弃费用的总和。国外的集成研究已经打破了传统 LCA 与 LCC 独立应用的局面,提出了相应的集成方法<sup>[1-5]</sup>,集成研究主要有两种集成思路:一是在 LCA 系统中融入 LCC 的各项功能,另一个是在 LCC 系统中,利用 LCA 的部分评价数据来计算生命周期成本中的环境成本。在国内, LCA 与 LCC 主要应用于产品环境成本的计算<sup>[6-7]</sup>,可以使环境成本的核算结果较传统方法核算结果更加完整和精确。国内外 LCA 与 LCC 集成的研究仍存在一些不足,注重清单数据的集成,忽略了最后影响评价部分的集成。同时,我们发现 LCA 与 LCC 集成评价结果一般显示环境效益与经济效益是不平衡的,因此须要对集成评价结果进行优化,使环境与经济双方效益达到平衡,以达到综合效益最大化。

本文首先提出 LCA 与 LCC 集成评价框架,并提出基于矩阵的集成评价算法,建立经济属性与环境属性之间的相互关系,然后,基于集成评价的结果,建立环境与成本的优化模型,并基于并行子空间优化(Concurrent subspace optimization, CSSO)算法进行优化,实现评价对象在经济性与环保性上的“双赢”。

## 1 LCA 与 LCC 集成

### 1.1 集成框架

LCC 可分为两部分,即与环境因子相关的生命周期成本(Environment-related LCC, ER-LCC)(如原材料成本、环境排放处理成本等)和与环境因子无关的生命周期成本(Non-environment-related LCC, NER-LCC)(如管理成本、设计成本等)。而本文旨在通过建立经济属性与环境属性之间的相互关系来获得综合效益评价结果,因此 LCA 与 LCC 的集成实际上就是 LCA 和 ER-LCC 的集成(图 1)。首先划定统一的时间边界和物理边界;过程输入因子通过系统边界进入各个过程,并相应输出成本因子和环境因子;获取的环境与成本数据,通过“清单数据集成”模块对成本与环境数据作集成处理;在影响评价集成时,对集成的清单数据分别从潜在影响值、环境与成本权重、综合效益三个方面进行评价;最后对评价结果做出环境效益、经济效益和二者相互关系及重要度的解释。

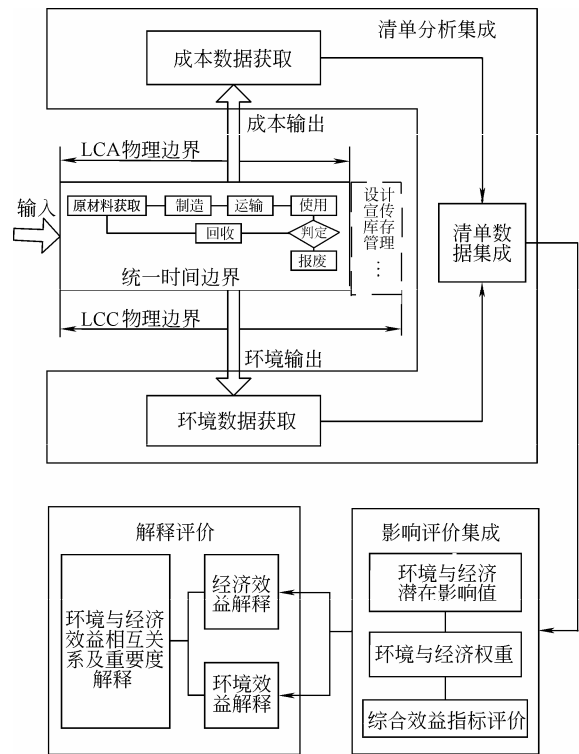


图 1 ER-LCC 与 LCA 集成框架

### 1.2 基于矩阵的集成方法

基于矩阵的集成方法如下所述。

(1) 边界的确定。物理边界主要包括同时具有环境属性和经济属性的过程,即原材料获取、加工制造、运输过程、使用过程、回收及报废处理过程等。时间边界从原材料获取阶段起,至报废完毕止,边界的起点作为 ER-LCC 的折现起点。

(2) 清单分析集成。清单分析的输入/输出随时间变化,成本函数分配到产品生命周期物理过程中去,从而实现清单分析的集成。

步骤 1: 划分单元过程。将产品生命周期物理过程分为若干个单元过程;每一个过程成本包括“输入”发生的成本和处理“环境输出”发生的成本;上一过程的输出进入下一过程时,不再进行重复成本计算;成本的最终计算结果全部折现到时间边界初期;假设各个单元过程初始输入输出数据已知。

步骤 2: 构造“输入—过程”矩阵

$$A = (a_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

式中,  $a_{ij}$  表示环境输入因子  $i$  在过程  $j$  的物理流量,  $a_{ij} \geq 0$ ;  $m$  为输入因素的个数;  $n$  为单元过程的个数。

步骤 3: 构造“环境输出—过程”矩阵

$$E = (e_{ij})_{3 \times n} \quad (2)$$

式中,  $e_{ij}$  表示未进入  $j+1$  过程的环境输出因子  $i$  在

过程  $j$  的物理流量,  $e_{ij} \geq 0$ ; 3 表示环境输出因子依次被归类为废气、固体废物、废液 3 种;  $n$  为划分的单元过程的个数。

步骤 4: 构造成本单价矩阵

$$C = (c_{11}, c_{21}, \dots, c_{m1})^T_{m \times 1} \quad (3)$$

$$D = (d_{11}, d_{21}, d_{31})^T \quad (4)$$

式中,  $c_{i1}$  表示对应矩阵  $A$  中的环境输入因子  $i$  的单价成本;  $d_{i1}$  表示处理矩阵  $E$  中对应的环境输出所花费的单价成本。构造  $b \times 1$  阶求和矩阵  $B = (1, 1, \dots, 1)^T_{b \times 1}$ , 其中  $b$  由与  $B$  左乘的矩阵的列矢量个数决定。

步骤 5: 引入成本折现公式

$$W_p = F \times (1+q)^{-y} \quad (5)$$

式中,  $W_p$  为未来成本的现值;  $F$  为未来成本的实际值;  $q$  为折现率;  $y$  为未来某时间段末期至现在的时间段(单位: 年)。

步骤 6: 建立“输入—过程”矩阵  $A$  和“环境输出—过程”矩阵  $E$  与成本的对应关系。因受时间因素影响, 不能进行统一成本核算再求折现, 故分别引入转换系数矩阵  $K_1$  和  $K_2$ , 将矩阵  $A$  和  $E$  分别与矩阵  $K_1$  和  $K_2$  进行 Hadamard 积(符号为  $\circ$ )。

$$A \circ K_1 = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} k^{t_1} & \dots & k^{t_1+t_2+\dots+t_j+\dots+t_n} \\ k^{t_1} & \dots & k^{t_1+t_2+\dots+t_j+\dots+t_n} \\ \vdots & k^{t_1+t_2+\dots+t_j} & \vdots \\ k^{t_1} & \dots & k^{t_1+t_2+\dots+t_j+\dots+t_n} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$E \circ K_2 = \begin{pmatrix} e_{11} & \dots & e_{1n} \\ e_{21} & \dots & e_{2n} \\ e_{31} & \dots & e_{3n} \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} k^{t_1} & k^{t_1+t_2} & \dots & k^{t_1+t_2+\dots+t_j+\dots+t_n} \\ k^{t_1} & k^{t_1+t_2} & \dots & k^{t_1+t_2+\dots+t_j+\dots+t_n} \\ k^{t_1} & k^{t_1+t_2} & \dots & k^{t_1+t_2+\dots+t_j+\dots+t_n} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中,  $k = 1/(1+q)$ ;  $t_j$  为过程  $j$  的时间。将成本单价矩阵  $C$  和  $D$  转换成矩阵

$$C^* = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{11} & \dots & c_{11} \\ c_{21} & c_{21} & \dots & c_{21} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & c_{m1} & \dots & c_{m1} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$D^* = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{11} & \dots & d_{11} \\ d_{21} & d_{21} & \dots & d_{21} \\ d_{31} & d_{31} & \dots & d_{31} \end{pmatrix} \quad (9)$$

则 ER-LCC 矩阵为

$$C_e = ((A \circ K_1) \circ C^*)^T \times B_{m \times 1} + ((E \circ K_2) \circ D^*)^T \times B_{3 \times 1} \quad (10)$$

$C_e$  矩阵是一个  $n \times 1$  矩阵( $n$  代表单元过程的个数), 其各个分量对应的是各单元过程和环境因子相关的

成本, 故  $\Sigma C_e$  是 ER-LCC 在时间边界初期的折现。

这种清单分析算法, 通过输入/输出时间系数, 能够将成本函数分配到物理过程中, 并建立环境因素与经济因素的对应关系, 最终输出综合环境属性和经济属性的清单分析表。

(3) 影响评价集成。影响评价的集成主要是对清单分析的数据进行环境及经济综合效益评估。其中环境影响评价中的分类、特征化、标准化和加权分析按照 SETAC 的方案步骤进行评价, 集成影响评价指标的层次结构图如图 2 所示, 利用层次分析法(AHP)确定各级指标权重。但环境影响和成本属于不同量纲, 必须进行归一化处理。采用转换设计指标法<sup>[8]</sup>, 即先将各项指标都转化为统一的量纲一值, 并使目标规格化, 得到量纲一的环境指标  $I_{amb}$  和经济指标  $I_e$ 。则有综合指标

$$I_s = \omega_1 \times I_e + \omega_2 \times I_{amb} \quad (11)$$

式中,  $\omega_1$  和  $\omega_2$  为经济权重和环境权重。综合指数  $I_s$  越低, 综合效益越好。

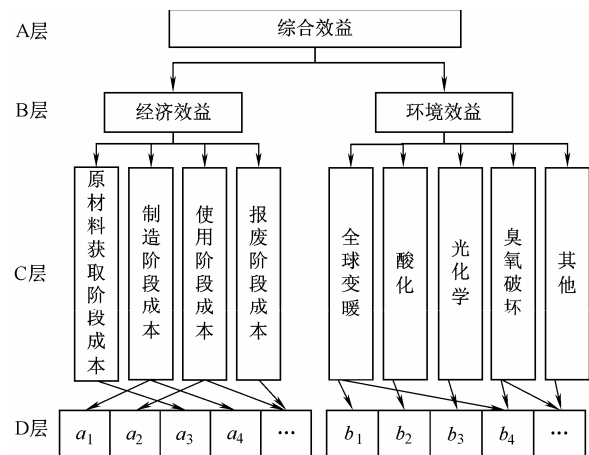


图 2 影响评价指标层次结构

$a_i$ ——各种成本因素, 如原材料费、能源费、环境排放处理费等

$b_i$ ——各种污染物

## 2 基于 CSSO 算法的优化

产品的结构参数、原材料类型、环境影响值和成本具有耦合性, 既有连续设计变量, 又有离散设计变量。基于 CSSO 算法, 不仅可以实现各个子空间并行优化, 而且优化效率高, 也避免敏感性分析, 是解决连续/离散混合变量的多学科设计优化问题的有效途径<sup>[9-10]</sup>, 如图 3 所示。

### 2.1 关键因素确定

影响环境和成本效益的因素很多, 但在产品设计阶段可以控制的关键因素主要有产品材料和主要结构参数。不同的原材料类型和结构参数对产品

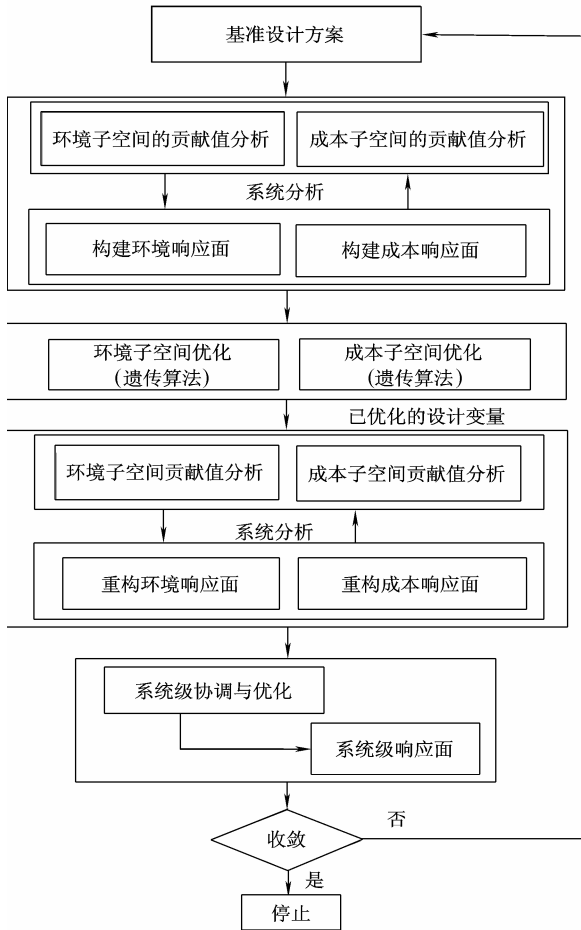


图 3 基于 CSSO 的优化程序结构

环境和成本属性有很大的影响。产品由多个零件组成，而各个零件的材料选择不同，故一个产品就存在多种材料组合方案。因此集成优化的目标就是，确定一组产品材料组合，以及相应零件的最佳结构参数，最终使产品的环境与成本综合效益最高。

(1) 初始设计方案的结构参数。对产品环境和经济效益有影响的结构参数主要有长度(或宽度、高度)和直径参数。长度参数为  $L=\{l_1, l_2, \dots, l_n\}$ ，直径参数为  $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ ， $n$  表示所包含零件的个数； $l_i$  表示零件  $i$  的长度， $l_i > 0$ ； $d_i$  表示零件  $i$  的直径， $d_i \geq 0$ 。

(2) 初始设计方案原材料选择及相应的材料单价、零件重量、环境及成本属性如表 1 所示，原材料类型用密度表示； $P_{im}$  和  $c_{im}$  表示零件  $i$  的第  $m$  种原材料的密度及单价， $m=1, 2, \dots, k_i$ ； $k_i$  表示零件  $i$  有  $k_i$  种原材料备选方案，产品共有  $\prod_{i=1}^n k_i$  种原材料组合。

表 1 原有设计方案基本属性表

零件	原材料	单价	重量	原材料备选种类及单价
$i$	$P_i^o$	$c_i^o$	$A_i$	$P_{im}, c_{im}$
零件	综合环境潜在影响值	原材料获取、加工、使用阶段的 ER-LCC	原材料获取、加工、使用阶段成本权重	
$i$	$Y_i^o$	$C_{i1}^o, C_{i2}^o, C_{i3}^o$	$W_{i1}, W_{i2}, W_{i3}$	

(3) 初始设计方案产品整体环境和成本的重要度关系，权重分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ 。

2.2 算法流程

基于 CSSO 优化程序结构如图 3。

(1) 确定设计变量。将产品零件分为三种类型：包含长度参数不含直径参数、包含直径参数不含长度参数和同时包含长度、直径参数，并分别用零件 I、零件 II、零件 III 表示(表 2)。其中  $X_i$  为连续变量； $P_i$  和  $c_i$  为离散变量， $P_i \in P_{im}$ ， $c_i \in c_{im}$ 。

表 2 零件类型

零件	长度	直径	材料	单价
I	$X_1$	—	$P_1$	$c_1$
II	—	$X_2$	$P_2$	$c_2$
III	$X_3$	$X_4$	$P_3$	$c_3$

(2) 建立各子空间计算模型。环境子空间环境潜在影响值  $Y_i$  如下。

零件 I

$$Y_1 = Y_1^o \times \frac{X_1 P_1}{l_1 P_1^o} \tag{12}$$

零件 II

$$Y_2 = Y_2^o \times \frac{X_2^2 P_2}{d_2^2 P_2^o} \tag{13}$$

零件 III

$$Y_3 = Y_3^o \times \frac{X_3^2 X_4 P_3}{d_3^2 l_3 P_3^o} \tag{14}$$

成本子空间的 ER-LCCC $_i$  如下。

零件 I

$$C_1 = \frac{Y_1}{Y_1^o} \left( W_{11} C_{11}^o \frac{c_1}{c_1^o} + W_{12} C_{12}^o + W_{13} C_{13}^o \right) \tag{15}$$

零件 II

$$C_2 = \frac{Y_2}{Y_2^o} \left( W_{21} C_{21}^o \frac{c_2}{c_2^o} + W_{22} C_{22}^o + W_{23} C_{23}^o \right) \tag{16}$$

零件 III

$$C_3 = \frac{Y_3}{Y_3^o} \left( W_{31} C_{31}^o \frac{c_3}{c_3^o} + W_{32} C_{32}^o + W_{33} C_{33}^o \right) \tag{17}$$

(3) 建立目标函数。三个零件的权重

$$Q_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^3 A_i} \tag{18}$$

环境子系统目标函数

$$\min Y = Q_1 \times Y_1 + Q_2 \times Y_2 + Q_3 \times Y_3 \tag{19}$$

成本子系统目标函数

$$\min C = Q_1 \times C_1 + Q_2 \times C_2 + Q_3 \times C_3 \quad (20)$$

系统级目标函数。CSSO 要求子空间优化问题均使用系统的约束条件和目标函数，但环境指标和成本指标属于不同量纲，同样采用转化设计指标法来统一目标函数

$$Q_1 \times Y_1^o + Q_2 \times Y_2^o + Q_3 \times Y_3^o = \text{Const} = \beta_1 \quad (21)$$

$$X_{j1} = \frac{1}{\beta_1} (Q_1 \times Y_1 + Q_2 \times Y_2 + Q_3 \times Y_3) \times 2\pi \quad (22)$$

$$F_1(X) = \frac{X_{j1}}{2\pi} - \sin X_{j1} \quad (23)$$

$$Q_1 \times (C_{11}^o + C_{12}^o + C_{13}^o) + Q_2 \times (C_{21}^o + C_{22}^o + C_{23}^o) + Q_3 \times (C_{31}^o + C_{32}^o + C_{33}^o) = \text{Const} = \beta_2 \quad (24)$$

$$X_{j2} = \frac{1}{\beta_2} (Q_1 \times C_1 + Q_2 \times C_2 + Q_3 \times C_3) \times 2\pi \quad (25)$$

$$F_2(X) = \frac{X_{j2}}{2\pi} - \sin X_{j2} \quad (26)$$

$$\min F(X) = \lambda_1 F_1(X) + \lambda_2 F_2(X) \quad (27)$$

(4) 构造基于人工神经网络响应面优化。利用建立的精确模型，求出与设计变量对应的状态变量值，并利用这些信息构造并行子空间优化，构造状态变量和设计变量之间的近似函数关系。环境子系统的设计变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  和原材料选择变量  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  映射为状态变量，即三个零件的环境潜在影响值  $Y_1^o$ 、 $Y_2^o$ 、 $Y_3^o$ 。成本子系统的离散变量  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  和环境子系统的状态变量  $Y_1^o$ 、 $Y_2^o$ 、 $Y_3^o$  映射为状态变量，即三个零件的经济潜在影响值  $C_1^o$ 、 $C_2^o$ 、 $C_3^o$ 。在系统层中通过所有已知设计变量与状态变量在限定约束条件下共同求出目标函数值  $F(X)$ ，其中所有状态变量都是从各子系统响应面上直接获取，因此响应面近似的速度非常快。

(5) 基于遗传算法的子系统优化。启发式算法在不依赖敏感度信息的前提下根据物理背景所映射的“适应度”信息来探求搜索方向，并以某种机制对搜索过的优良解进行保留，从而能以很大的概率找到问题的全局最优解，所以这里的子空间优化和系统层优化中使用了遗传算法作为优化工具。在子空间及系统层的遗传算法优化中通过试运算进行算法中参数的调试。优化过程中，涉及到其他学科的状态变量信息可通过响应面来获取。

### 3 实例分析

以 4135G 型柴油发动机为研究对象，并以国内环境影响数据和标准为依据，利用 LCA 与 LCC 集成评价方法进行环境与经济的综合评价。

#### 3.1 产品边界确定

功能单元为 4135G 型柴油发动机一辆。对柴油

发动机的集成评价将涉及多个零件及其相关过程，数据多而复杂。本文对柴油发动机进行简化处理。基本假设：① 主要考虑实现柴油机主要结构和功能的四个主要零件，即活塞，气缸，连杆和曲轴<sup>[11]</sup>。② 柴油机涉及的原材料繁多，有铸铁、铜和铝合金等，假设初始设计方案各个零件的原材料均为普通钢。③ 将每一单元过程的输入/输出流分为半成品、电能、废屑和机床清洗液等四种主要类型。④ 柴油发动机的废弃回收方式为 70% 的回收和 30% 的掩埋两种。确定以原材料获取时间始，经过加工制造、使用、回收报废为止的时间段作为系统的时间边界。各阶段成本都折现到原材料获取的初期，现假定 2004 年初为原材料生产起始点。

#### 3.2 清单分析计算

首先计算四个过程时间，原材料生产及产品制造过程时间为批量的过程时间。按照大批量的生产模式估计，普通钢加工过程时间  $t_1=0.12$  a；柴油发动机加工过程时间  $t_2=0.04$  a；使用过程时间  $t_3=5$  a(取发动机平均寿命 15 万 km，平均行驶 3 万 km/a)；废弃处理过程时间  $t_4=0.08$  a。2004~2009 年钢铁行业和机械加工行业的平均折现率  $q=15\%$ ， $k=1/(1+q)=0.87$ ，“输入—过程”矩阵

	原材料获取	加工制造	使用	废弃处理
水/kg	15 357.8	0	4 000	0
石灰石/kg	767.89	0	0	0
生铁/kg	406.51	0	0	0
氧/kg	370.16	0	1 738.0	0
原油/kg	67.76	0	0	0
矿石/kg	74.61	0	0	0
电/(kW·h)	1 916.94	122.31	0	0
燃油/kg	33.09	0	0	3.44
煤/kg	513.77	0	0	0
冷却液/kg	0	18.158	0	0
柴油/kg	0	0	7 200	0

(28)

对应矩阵  $A$  的各个输入因子构造成本矩阵  $C$  和输入转换系数矩阵  $K$

$$C = \begin{pmatrix} 0.002 & 0.12 & 1.05 & 0 & 3.23 & 0.87 \\ 0.002 & 0.12 & 1.05 & 0 & 3.23 & 0.87 \\ 0.002 & 0.12 & 1.05 & 0 & 3.23 & 0.87 \\ 0.002 & 0.12 & 1.05 & 0 & 3.23 & 0.87 \\ 0.7 & 1.5 & 0.56 & 0.12 & 3.05 \\ 0.7 & 1.5 & 0.56 & 0.12 & 3.05 \\ 0.7 & 1.5 & 0.56 & 0.12 & 3.05 \\ 0.7 & 1.5 & 0.56 & 0.12 & 3.05 \end{pmatrix}^T \quad (29)$$

$$K = \begin{pmatrix} 0.983 & 0.983 & 0.983 & 0.983 & 0.983 & 0.983 \\ 0.978 & 0.978 & 0.978 & 0.978 & 0.978 & 0.978 \\ 0.487 & 0.487 & 0.487 & 0.487 & 0.487 & 0.487 \\ 0.482 & 0.482 & 0.482 & 0.482 & 0.482 & 0.482 \end{pmatrix}^T \quad (30)$$

构造求和矩阵  $B=(1,1, \dots, 1)_{11 \times 1}^T$ ，则由  $Ce=((A \cdot K) \cdot C)^T \times B$  得到与环境输入因子相关的过程成本(ER-C)，产品的集成清单分析结果如表 3 所示。

表 3 4136G 型柴油发动机的清单数据

过程	过程成本 ER-C/元	输入		输出	
		名称	值	名称	值
原材料 开采	2 469.97	水	15 357.8	钢铁	366.9
		石灰石	767.89	矿渣	1 797.77
		生铁	406.51	工业混 合固弃	397.68
		氧	370.16	粉尘、灰尘	134.84
		原油	67.76	悬浮物	54.45
		粘土	28.46	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.447
		橄榄石	17.62	COD	0.127
		铁锰矿	10.84	BOD	0.002
		白云石	6.32	酚	0.002
		氟石	5.87	Na <sup>+</sup>	0.172
		砂砾	2.53	粉尘、灰尘	20.33
		斑脱土	2.17	CO	49.69
		铝土矿	0.68	CO <sub>2</sub>	3 703.94
		氯化钠	0.12	SO <sub>x</sub>	23.04
		空气	0.02	NO <sub>x</sub>	7.23
		氮	0.005	H <sub>2</sub> S	0.039
		硫	0.001	HCl	0.395
		电	1 916.94	碳氢化合物	0.859
		燃油	33.09	甲烷	8.13
		煤	513.77	—	—
加工 制造	85.86	毛坯	366.9	成品	317.1
		冷却液	18.16	铁屑	49.8
		电	122.31	—	—
使用 过程	14 367.19	柴油	7 200	CO	474
		氧	1 738	CO <sub>2</sub>	2 212
		氮	2.91	HC	169.5
		水	4 000	NO <sub>x</sub>	15.8
废弃 处理	1.28	—	—	热能	237 600
		燃油	3.44	回收钢铁	221.97
—	—	—	—	废铁(掩埋)	95.13

注：电单位为 kW·h，热能单位为 MJ，其他单位为 kg。

### 3.3 影响评价计算

参考 SETAC 的环境影响分类方案，环境影响类型主要分为全球变暖、光化学臭氧合成、酸化和固体废物四类，环境评价结果如表 4 所示。将环境影响类型的潜在影响值 Y(当量因子)与对应的权重指标相乘即得到最终的量化结果(图 4)。

表 4 柴油发动机生命周期环境经济潜在影响值与指标权重

影响类型	原材料获取	产品加工	使用过程	回收过程
	ER-C/元	ER-C/元	ER-C/元	ER-C/元
潜在影响值	2 469.97	85.86	14 367.19	1.28
环境、经济 指标权重	0.14	0.03	0.21	0.01
影响类型	全球变暖	固体废物	酸化 Y/ 当量因子	光化学 臭氧合成 Y/当量因子
	Y/当量因子	Y/当量因子	当量因子	当量因子
潜在影响值	9 875.8	2 529.7	39.6	23.0
环境、经济 指标权重	0.32	0.25	0.06	0.02

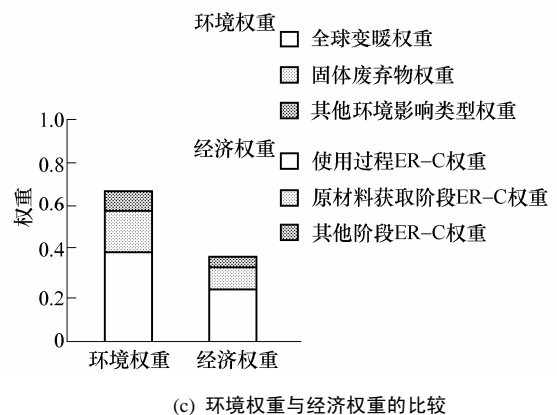
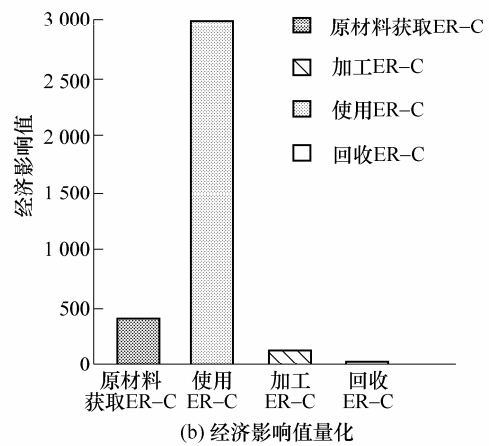
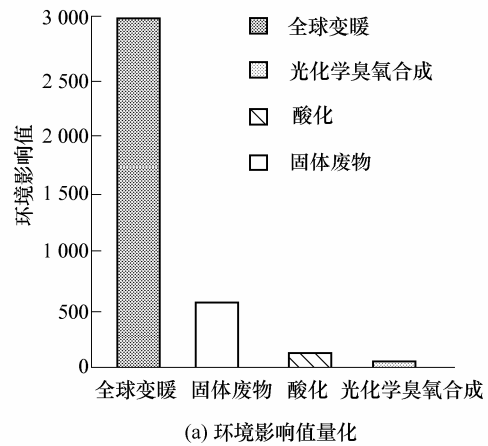


图 4 环境影响评价结果

### 3.4 解释集成评价

(1) CO<sub>2</sub>、CO、CH 引起全球变暖是柴油发动机的主要环境影响，占有绝对比例。

(2) 使用过程和原材料获取过程成本是柴油发动机 ER-LCC 的主要部分，对这两个阶段进行环境改善将会对产品全生命周期的成本影响最大，因此实现这两个阶段环境与经济的平衡是提高产品综合效益的关键。

(3) 柴油的环境权重明显大于其经济权重，说明其环境重要性要高于经济重要性，需对柴油进行环境改善，甚至可以牺牲部分经济利益。

### 3.5 优化计算

(1) 前提条件。柴油发动机初始方案的结构参数和原材料等参数如表 5 所示。根据上节集成清单分析，各个零件的环境潜在影响值、各生命阶段成本的结果及所对应的权重如表 5 所示。产品整体环境与成本的重要度关系的权重分别为： $\lambda_1=0.61$ ， $\lambda_2=0.39$ 。备选的原材料种类如表 6 所示。

表 5 柴油发动机初始方案的参数及集成评价

零件	结构参数 l(或 d)/mm	原材料	密度 $\rho /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	单价 C/(元·t <sup>-1</sup> )	质量 m/kg
活塞	140	普通钢	7.8	4 000	3.08
气缸	135	普通钢	7.8	4 000	228
连杆	110, 90	普通钢	7.8	4 000	6.03
主轴颈	50, 110	普通钢	7.8	4 000	52.55
零件	原材料获取 ER-C C/元	加工 ER-C/元	使用 ER-C/元	回收 ER-C/元	综合环境 潜在影响值
活塞	74.1	2.6	431.0	0.04	113.9
气缸	1 178.4	61.8	10 344.4	0.92	2 723.8
连杆	197.6	6.9	1 149.4	0.10	303.6
主轴颈	419.9	14.6	2 442.4	0.22	645.2
	原材料获取 ER-C 权重	加工 ER-C 权重	使用 ER-C 权重	回收 ER-C 权重	
	0.36	0.08	0.54	0.02	
	0.36	0.08	0.54	0.02	
	0.36	0.08	0.54	0.02	
	0.36	0.08	0.54	0.02	

表 6 备选的原材料种类

零件	原材料	密度 $\rho /(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	单价 C/(元·t <sup>-1</sup> )
活塞	铝铜镍镁多元合金	3.5	3 747
	铝硅镍镁铜多元合金	4.2	4 082
气缸	铸铁	7.8	4 000
	铝合金	2.7	4 350
连杆	45 中碳钢	7.8	3 982
	40Cr 中碳钢	7.85	4 132
主轴颈	普通碳钢	7.8	4 000

(2) 优化模型。设目标函数为环境与经济综合指标函数  $F(\mathbf{X})$  最小。设各零件的结构参数为设计变量(表 7)， $X_i$  为连续变量， $\rho_i$  和  $c_i$  为离散变量。

表 7 零件类

零件	长度	直径	材料	单价
活塞	$X_1$ (行程)	—	$P_1$	$c_1$
气缸	—	$X_2$	$P_2$	$c_2$
连杆	$X_4$	$X_3$	$P_3$	$c_3$
主轴颈	$X_5$	$X_3$	$P_4$	$c_4$

直列式柴油发动机的结构设计要求活塞行程/发动机缸径、连杆直径/发动机缸径、连杆长度/连杆直径、主轴颈直径/发动机缸径、主轴颈长度/直径等这些结构参数的比值均须满足一定的约束条件。

$$\text{s.t. } V_k = 225 \times \frac{N_e \tau}{P_e n i} = \frac{\pi}{4} X_1 X_2^2 \times 10^{-6} = 8L \quad (31)$$

$$0.42 - X_4/X_2 \leq 0$$

$$X_1/X_2 - 1.3 \leq 0$$

$$0.9 - X_1/X_2 \leq 0$$

$$X_3/X_2 - 0.85 \leq 0$$

$$0.72 - X_5/X_2 \leq 0$$

$$X_6/X_5 - 0.5 \leq 0$$

$$0.45 - X_6/X_5 \leq 0$$

$$X_3/X_2 - 0.72 \leq 0$$

$$0.64 - X_3/X_2 \leq 0$$

$$X_4/X_2 - 0.87 \leq 0$$

式中， $P_e$  为平均有效压力； $i$  为气缸数； $V_h$  为一个气缸的工作容积； $n$  为主轴转速； $\tau$  为冲程数。

(3) 优化结果。将上述所有数据带入第 2.2 节中建立的集成优化应用流程，其中子空间及系统层的遗传算法中种群规模取 50，进化代数取 400，交叉概率和变异概率分别取 0.50、0.015。整个优化结果如表 8 所示，优化前后环境与成本效益对比如表 9 所示。通过基于并行子空间优化的 CSSO 算法，能够为产品设计提供最优的结构参数和原材料选择方案，使产品整体的环境潜在影响值和 ER-LCC 下降，最终提高产品的综合效益，实现在环境和经济效益上的双赢。

表 8 优化结果

参数	活塞	气缸	连杆	主轴颈
结构参数	行程 s/cm	直径 $d_c$ /cm	直径 $d_l$ /cm	长度 $l_l$ /cm
				直径 $d_j$ /cm
	157.63	130.06	95.64	105.68
原材料	铝铜镍镁铜多元合金	铝合金	40Cr 中碳钢	普通碳钢

表 9 优化前后环境与成本效益对比

目标值	环境潜在影响值 $Y$				与环境因子相关的生命周期成本 $C$ /元			
	活塞 $Y_1$	气缸 $Y_2$	连杆 $Y_3$	主轴颈 $Y_4$	活塞 $C_1$	气缸 $C_2$	连杆 $C_3$	主轴颈 $C_4$
原方案	113.9	2 732.8	303.6	645.2	507.7	11 585.5	1 354.6	2 877.1
产品效益	$Y = \sum_{i=1}^4 Q_i Y_i = 2 121.6$				$C = \sum_{i=1}^4 Q_i C_i = 8 954.2$			
改进方案	148.5	2 443.87	352.8	603.6	425.9	11 611.6	1 442.9	2 056.9
产品效益	1 894.9				8 838.2			
改进程度	下降 10.7%				下降 1.3%			

## 4 结论

(1) 提出新的集成框架和基于矩阵的集成算法, 实现二者真正意义上的集成。

(2) 在集成评价的基础上, 提出 LCA 与 LCC 优化模型和基于并行子空间优化 CSSO 算法的优化算法, 改善产品设计, 实现产品在环境和成本综合效益上的最优。

(3) 实例研究和计算展示了所提方法的有效性。

### 参 考 文 献

- [1] SENTHIL Kumaran D, ONG S K, NEE A Y C, et al. A proposed tool to integrate environmental and economical assessments of products[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2003(23): 51-72.
- [2] NORRIS G A. Integrating life cycle cost analysis and LCA[J]. International Journal of LCA 2001, 6(2): 118-121.
- [3] REICH Marcus Carlsson. Economic assessment of municipal waste management systems—case studies using a combination of life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) [J]. Cleaner Production, 2005(13): 253-263.
- [4] BOVEA M D, VIDAL R. Increasing product value by integrating environmental impact, costs and customer valuation[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2004(41): 133-145.
- [5] BENGTT Steen. Environmental costs and benefits in life cycle costing[J]. Management of Environmental Quality, 2006, 16 (2): 107-118.
- [6] 束庆, 张旭. 生命周期评价和生命周期成本分析的整合方法研究[J]. 同济大学学报, 2003, 8(4): 81-86.
- [7] 曾建春, 蔡建国. 面向产品生命周期的环境、成本和性能多指标评价[J]. 中国机械工程, 2000, 11(9): 975-978.
- [8] 刘惟信. 机械最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [9] SHIN M K, KANG B S, PARK G J. Application of the multidisciplinary design optimization algorithm to the design of a belt-integrated seat while considering crashworthiness[J]. Automobile Engineering, 2005, 219 (11): 1 281-1 292.
- [10] 余庆雄, 丁运亮. 多学科设计优化算法及其在飞行器设计中的应用[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 1-6.
- [11] 上海柴油机厂. 135 系列柴油机零件目录[M]. 北京: 机械工业出版社, 1977.

作者简介: 邵新宇, 男, 1968 年出生, 博士, 教授。研究方向为数字化工艺与装备、制造系统优化等, 发表论文 50 余篇。

E-mail: shaoxy@mail.hust.edu.cn