

绿色产品设计方案优选的目标规划模型

谢家平

(上海财经大学国际工商管理学院,上海 200433)

摘要:产品的设计方案决定其环保属性,各种绿色设计方案对环境的影响和资源消耗不同,所产生的企业经济效益和生态效益也不一样,各有其优势,也存在不足。如何找到各方面都较满意的设计方案,这就需要进行方案优选。因此,试图建立一个设计方案选优的0-1型目标规划模型,使之在满足一系列约束的基础上,尽量实现各种预期目标。通过模型的求解及其参数变动分析,还能明确其差距所在,以指导设计方案的改进。

关键词:产品设计;方案选优;0-1规划;目标规划

中图分类号: TB472

文献标识码: A

文章编号: 1001-7348(2004)12-0024-03

0 前言

制造企业将资源转变为产品的制造过程,一方面消耗大量有限的资源,产出有用物(产品);另一方面产生废弃物(废水、废气、废渣等废弃资源,以及噪音等无用物)。有用物随着产品生命周期的缩短,很快成为被废弃的垃圾。此外,制造产品所需资源的生产过程、产品的使用和废弃处理过程也需消耗资源,还要产生废弃物。废弃物的排放又将会造成水污染、大气污染或土壤污染,使生态环境退化。根据联合国环境保护组织统计,造成环境污染的排放物有70%以上来自制造业,制造业是当前环境污染问题的主要根源。因此,随着各国环保法规的出台和消费者环保意识的日益增强,以牺牲资源和环境为代价的工业文明难以持久。污染环境的企业必将受到政府的管制,从而将损害企业形象,失去消费者的信任,使其市场份额急剧萎缩,对企业经营业绩将产生不利的影响。面对人类社会可持续发展的需要,制造企业必须尽可能减少资源消耗和尽可能解决所带来的环境问题,以顺应绿色运动这一主流,这就要求企业进行生产方式的变革,采取基于环保的绿色制造策略。由于产品设

计方案决定了资源的利用率和对环境的影响程度,所以应进行绿色设计(Green Design)。绿色设计是指在产品设计阶段就充分考虑其全生命周期过程的环境影响和资源效率的一种设计模式。也就是说,在考虑产品的功能、质量、开发周期和成本的同时,优化各有关设计因素,使所设计的产品从材料选择、生产制造、包装运输、使用维护到报废处理的全生命周期过程对环境的影响(负作用)最小,资源利用效率最高,并使企业经济效益和社会效益能够协调优化。但一般而言,各种方案都有其优势,也存在不足,对环境的影响和资源消耗不同,所产生的企业经济效益和社会效益也不一样。如何找到各方面都较满意的设计方案,这就需要进行方案优选。因此,本文试图建立一个设计方案选优的0-1型目标规划模型,使之在满足一系列约束的基础上,尽量实现各种预期的目标。通过模型的求解及其参数变动分析,还能明确其差距所在,以指导设计方案的改进。

1 绿色设计的目标

产品对资源和环境的影响涉及全生命周期的闭环物流过程,物流在供应链及逆向

供应链中转换,企业为了获利,需要进行一系列的增值活动。这些活动既耗费资源,又将产生大量的废弃物,构成企业的环境价值链。也就是说,企业所创造的价值不但包括经济效益,还有生态效益,这些价值的实现是通过产品设计、制造、包装、运输、使用到报废处理等产品生命周期过程的一系列创造价值的经营活动得以实现的,这一过程的经营组成企业的环境价值链。因此,绿色产品设计决策中,衡量产品设计方案的性能属性目标和经济属性目标,同时也要兼顾生产、使用、回收处理的环境属性目标、资源属性目标、能源属性目标等。而在这些目标中,有最小化的,也有最大化的;有主要的,也有次要的,有近期目标,也有远期目标;有定量的,也有定性的(需半定量化处理);有互相补充的,也有相互对立的;有必须实现的,也有希望达到的。对这样复杂的决策问题,难以转化成单一目标进行选优,我们可以采用求解含有多个相互冲突目标的目标规划模型。绿色设计的相关目标如下:

(1)性能属性目标:如产品的功能目标、

收稿日期:2004-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助(70472080)

作者简介:谢家平(1963-),四川安岳人,上海财经大学国际工商管理学院副教授,博士,从事管理运筹学、管理系统工程、生产与运作管理方面的教学科研工作。

质量目标、操作安全性目标等国家标准或行业标准,品种多样性目标、维护简便性目标等企业标准。

(2)环境属性目标:主要考虑控制水污染、大气污染、土壤污染和噪声污染。控制水污染目标包括减少物理性污染物(如沉积物、漂浮物、浑浊物)的排放量,降低化学性污染物(如pH值、硫酸盐、氯化物、溶解性铁、锰、铜、硝酸盐、亚硝酸盐、磷、氟化物)的浓度,防止生物性污染物(如滋生水生生物)的排放量;控制大气污染目标包括减少废气污染物(如SO₂、氮氧化物、NO₂、CO、臭氧、铅、苯并芘、氟化物)的排放量,减少颗粒污染物(如粉尘)的污染量;控制废弃物污染土壤目标(无机污染物、有机污染物);控制噪声污染目标等。

(3)经济属性目标:包括收益和成本两大类目标。收益类目标希望越大越好,如销售收入目标、产品盈利能力目标、再用收益目标、再生收益目标等;成本类目标希望越小越好,如企业成本目标(设计成本、制造成本、储运成本、售后服务成本等),用户成本目标(运行费用、维护费用等),生态环境成本目标(污染治理费、污染排放费、报废处理费等)。

(4)资源属性目标:如材料种类目标、单位产品资源消耗量目标、设备工具消耗情况目标、资源利用率目标、废弃资源回收率目标、资源可再生性目标、材料易降解性目标、材料有毒有害性目标等。

(5)能源属性目标:如能源种类目标、能源消耗目标(材料生产过程的能耗、产品加工过程的能耗、产品使用过程的能耗、回收处理过程的能耗)、消耗能源的可再生性目标、是否是清洁能源目标等。

必须严格实现的目标将作为绝对约束。对于所设计的产品而言,产品的性能属性目标和环境属性目标一般都有一个基本要求。例如必须实现的基本功能参数,无故障连续工作小时数等质量水平,水污染物允许排放量,大气污染允许排放量,固体废弃污染物的填埋数量,噪声污染限额等等,都有一个必须达到的国家或行业标准,作为绝对约束的右端常数项。此外,企业生产需要消耗资源,受生产系统能力限制,构成系统约束,也是绝对约束。

预期希望实现的目标构成目标约束,产

品的经济属性目标、资源属性目标、能源属性目标一般都没有绝对标准,但存在期望值。例如,设计成本最小化、生产制造成本最小化、使用维护成本最小化、废弃处理成本支出最小化、销售收入最大化、产品盈利能力最大化、再用收益最大化、再生收益最大化、填埋成本最小化、资源消耗数量最小化、再用数量最大化、再生数量最大化等等。

3 方案选优的0-1型目标规划模型

设计方案共有n个,对于第i个方案而言,“选用与否”是求解“是”或“非”的决策问题,可以转化为0-1规划问题,所以引入决策变量X_i(只取0或1值):

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{表示选择第 } i \text{ 个设计方案;} \\ 0 & \text{表示不选择第 } i \text{ 个设计方案。} \end{cases}$$

3.1 绝对约束

(1)产品性能标准约束:产品方案i的基本功能参数、质量水平、安全性等第j项性能的指标值F_{ij}不低于其有关标准值EF_j。

$$\sum_j F_{ij} \cdot X_i \geq EF_j$$

(2)废弃物排放量约束:产品方案i的生产、使用、废气处理等过程(用阶段序号t来识别)所排放的废弃物j的数量W_{ij}不超过其允许排放量EW_j,即:

$$\sum_j W_{ij} \cdot X_i \leq EW_j$$

(3)技术改造资金约束:选择产品方案i需进行技术改造的资金需求量M_i不超过企业可用的技术改造资金计划总量EM,即:

$$\sum_i M_i \cdot X_i \leq EM$$

(4)企业生产能力约束:设企业生产单位产品i所需的设备或人力等生产资源l的数量为a_{li},产品i的产量为Q_i,则资源l的消耗数量(a_{li}·Q_i)不应超过企业可用资源l的总量EM_l,即:

$$\sum_i a_{li} \cdot Q_i \cdot X_i \leq EM_l$$

(5)方案选择的唯一性约束:从n个设计方案中只选择其中一个,即:

$$\sum_i X_i = 1$$

(6)决策变量是非取值约束:决策变量取值为1或0,即:

$$X_i = 1 \text{ 或 } 0$$

3.2 目标约束

除了上述绝对约束之外,还存在另一类不同级别的目标约束。为了从数量上描述各目标的期望值达到的程度,对第k个目标函数分别列入正、负偏差变量d_k⁺,d_k⁻,且d_k⁺和d_k⁻≥0。d_k⁺表示第k个目标超过期望值的数值;d_k⁻表示第k个目标未达到期望值的数值。对于每一个目标约束都要确立一个希望达到的目标期望值E_k,作为目标约束的右端项。假设设计方案i第k个目标的实现值为g_{ik},故有如下目标约束:

$$\sum_i g_{ik} \cdot X_i + d_k^+ - d_k^- = E_k$$

(1)设计成本最小化:设计成本包括市场调研、可行性分析、产品设计、产品试验、修正设计、编写设计文档等费用支出,其期望设计成本为DC*,而方案i的设计成本为DC_i,则有:

$$\sum_i DC_i \cdot X_i + d_i^+ - d_i^- = DC^*$$

(2)生产成本最小化:既要考虑制造成本,又需考虑环境成本。制造成本包括材料消耗、能源消耗、设备工时、劳动工时、在制品的运送与存放、产品测试与检验等物料转换的制造费用支出,希望目标值为MC*,方案i的制造成本记为MC_i,则有:

$$\sum_i MC_i \cdot X_i + d_i^+ - d_i^- = MC^*$$

产品生产制造过程中解决环境污染和生态破坏需支付环境成本,希望目标值为EC*,方案i的环境成本包括:控制向大气、水体、土壤超标排放对人有害的物质所需支付的污染排放控制费用LC_i;对生产过程排放的“三废”进行净化处理,使之达到排放标准所需支付的污染排放处理费用PC_i;排放废弃物的收集、运输和焚烧或填埋等废弃物处理成本WC_i;为实现环境保护目标和可持续发展战略,避免对环境、资源的过度开发和利用,将对破坏环境、资源的行为进行调节而征收的环境税、资源税TC_i;因生产排放的“三废”超过排放标准以及滥用资源而需支付的罚款成本EF_i,则有:

$$\sum_i (LC_i + PC_i + WC_i + TC_i + EF_i) \cdot X_i + d_i^+ - d_i^- = EC^*$$

(3)维护使用成本最小化:维护使用成本包括运行成本、维修成本和使用环保费用。运行成本是用户为产品在使用期间所耗费的人、财、物资源而支付的费用OC_i;维修成本是在使用期限内,为维护产品正常功能

而进行维护、修理或零件更换所需花费的费用 RC_i ；使用过程导致环境问题而需支付的环保费用 UE_i ；假设维护使用成本的希望目标值为 UC^* ，则有：

$$\sum_i (OC_i + RC_i + UE_i) \cdot X_i + d_5 - d_5^* = UC^*$$

(4) 销售收入最大化：设单位产品 i 的售价为 P_i ，则其销售收入 $R_{销售} = P_i \cdot Q_i$ ，即有：

$$\sum_i P_i \cdot Q_i \cdot X_i + d_5 - d_5^* = R_{销售}^*$$

(5) 再用收益最大化：设方案 i 的零部件 A_y 的数量为 Q_y ，重量为 W_y (kg)，再用成本为 C_{py} ，相应取得的再用价值为 R_{py} ，填埋成本为 C_L (元/kg)。由于不同零部件的填埋处理成本存在差异，所以假设其废弃处理成本指数为 DI_y ($0 \leq DI_y \leq 10$, $DI_y = 0$ 表示废弃处理需支付的成本级别最低, $DI_y = 10$ 表示废弃处理需支付的成本级别最高)。再用减少废弃物数量将带来环境处理费的下降，从而避免因环境问题而遭受的经济处罚或减少填埋成本，获得环保收益 $C_L \cdot DI_y \cdot W_y \cdot Q_y$ 。引入 A_y 的再用准则变量 $PD_y = R_{py} - C_{py} + C_L \cdot DI_y \cdot W_y$ ，如果 $PD_y \geq 0$ ，则再用可以获益，再用零部件的总收益为：

$$\sum_i \left[\sum_{j \in PD_j \geq 0} (R_{py} - C_{py} + C_L \cdot DI_y \cdot W_y) \cdot Q_y - C_{拆} \right] \cdot X_i + d_5 - d_5^* = R_{再用}^*$$

式中， $C_{拆}$ 表示产品 i 的拆卸成本。引入拆卸零部件 A_y 的标识变量 Y_y ，如果 $PD_y \geq 0$ ，则再用可以获益，有 $Y_y = 1$ ，表示 A_y 需要进行拆卸；反之， $PD_y < 0$ ，有 $Y_y = 0$ 则不需要拆卸。产品 i 的拆卸标识取值组成列向量 Y_i 。设产品 i 的拆卸可达矩阵 $R_i = (r_{ik})$ ，它反映了产品各零部件 A_y 与 A_k 之间是否存在直接或间接的连接关系。将拆卸可达矩阵 R_i 与拆卸标识向量 Y_i 进行“逻辑乘”运算，即得拆卸标识列向量 $ID_i = R_i \cdot Y_i$ ，元素为 1 的零部件表示需要拆卸处理；反之，则不需要拆卸处理。将各零部件的拆卸成本 $c_d(A_y)$ 组成行向量 C_{di} ，再与拆卸标识列向量 ID_i 相乘求和，则可求拆卸成本 $C_{拆}$ ，其函数式如下：

$$C_{拆} = C_{di} \cdot ID_i = \sum_{A_y} [c_d(A_y) \cdot ID(A_y)]$$

(6) 再生收益最大化：设方案 i 的第 j 种零部件可以用于材料再生的比例为 RP_{jy} ，再生收入为 Rm_{jy} (元/kg)，再生成本 Cm_{jy} (包括碎裂、分类、再生等回收材料的过程) (元/kg)，为了判断材料再生是否获利，引入变量

$RD_{jy} = Rm_{jy} - Cm_{jy} + C_L \cdot DI_{jy}$ ；如果 $RD_{jy} \geq 0$ ，则进行再生处理回收材料可以获利。再生处理所支付的费用： $Cm_{jy} \cdot W_{jy} \cdot RP_{jy}$ ，再生材料的收入为 $Rm_{jy} \cdot W_{jy} \cdot RP_{jy}$ ，再生所减少的废弃处理带来的环保收益： $C_L \cdot DI_{jy} \cdot W_{jy} \cdot RP_{jy}$ 。因此，材料再生的总收益为：

$$\sum_i \left[\sum_{j \in RD_{jy} \geq 0} (Rm_{jy} - Cm_{jy} + C_L \cdot DI_{jy}) \cdot W_{jy} \cdot RP_{jy} \cdot Q_{jy} \right] \cdot X_i + d_7 - d_7^* = R_{再生}^*$$

(7) 填埋成本最小化：如果零部件 A_y 满足 $PD_y \geq RD_y$ ，则作再用处理，不需进行填埋；反之，作材料再生处理，但还需进行废弃填埋的重量为 $W_y \cdot (1 - RP_{jy})$ ；零部件 A_y 则废弃处理的成本如下：

$$\sum_i \left[\sum_{j \in PD_y < RD_y} (C_L \cdot DI_{jy} \cdot W_{jy} \cdot (1 - RP_{jy}) \cdot Q_{jy}) \right] \cdot X_i + d_8 - d_8^* = C_{再生}^*$$

(8) 再生数量最大化： $PD_y \geq 0$ ，则进行再用处理，再用数量为 Q_y ，即有：

$$\sum_i \sum_{j \in PD_j \geq 0} Q_y \cdot X_i + d_9 - d_9^* = Q_{再生}^*$$

(9) 再生数量最大化： $RD_y \geq 0$ ，则进行再生处理，再生重量为 $W_y \cdot RP_{jy} \cdot Q_y$ ，即有：

$$\sum_i \left(\sum_{j \in RD_{jy} \geq 0} W_{jy} \cdot RP_{jy} \cdot Q_{jy} \right) \cdot X_i + d_{10} - d_{10}^* = Q_{再生}^*$$

(10) 资源消耗数量最小化：设企业生产产品 i 所需第 l 类资源的数量为 $a_{il} \cdot Q_i$ ，即有：

$$\sum_i a_{il} \cdot Q_i \cdot X_i + d_{11} - d_{11}^* = EQ_l$$

3.3 目标达成函数

为区别这些目标的重要程度，引入优先等级因子 P_k ($k=1, 2, \dots, K$) 来表示第 k 等级的目标，其关系是 $P_1 \gg P_2 \gg \dots \gg P_K$ ，符号“ \gg ”的意思是远远大于；处于同一个优先等级的目标可能不止一个，为区别它们之间的相对重要性，分别赋以不同的权数 w 。

构造目标达成函数以求得有关偏差变量的最小值，存在 3 种基本形式的组合：①若要求尽可能达到规定的目标期望值，则应使相应的正、负偏差变量 d_+^k 和 d_-^k 都尽可能达到最小。②若希望尽可能不低于期望值，则应使相应的负偏差变量 d_-^k 尽可能的小，而不关心超出量 d_+^k 的大小，故只需将 d_-^k 列入目标函数中。③若希望不得超过期望值，则应使相应的正偏差变量 d_+^k 尽可能小，而不关心低于值 d_-^k 的大小，故只需将 d_+^k 列入目标函数中。上述目标约束的达成函数如下：

$$\min Z = \sum_i P_k \sum_j (w_1 d_1^+ + w_2 d_1^-)$$

本文考虑三级目标， P_1 级：设计成本最小化、生产成本最小化、维护使用成本最小化，其权重分别为 w_1, w_2, w_3, w_4 ，即有 $\min Z = P_1 (w_1 d_1^+ + w_2 d_2^- + w_3 d_3^+ + w_4 d_4^-)$ ； P_2 级：销售收入最大化、再用收益最大化、再生收益最大化、填埋成本最小化，其权重分别为 w_5, w_6, w_7, w_8 ，即有 $\min Z = P_2 (w_5 d_5^+ + w_6 d_6^- + w_7 d_7^+ + w_8 d_8^-)$ ； P_3 级：再用数量最大化、再生数量最大化、资源消耗数量最小化，其权重分别为 w_9, w_{10}, w_{11} ，即有 $\min Z = P_3 (w_9 d_9^+ + w_{10} d_{10}^- + w_{11} d_{11}^-)$ 。目标约束的达成函数：

$$\min Z = P_1 (w_1 d_1^+ + w_2 d_2^- + w_3 d_3^+ + w_4 d_4^-) + P_2 (w_5 d_5^+ + w_6 d_6^- + w_7 d_7^+ + w_8 d_8^-) + P_3 (w_9 d_9^+ + w_{10} d_{10}^- + w_{11} d_{11}^-)$$

4 结束语

面对人类社会可持续发展的需要，制造企业必须尽可能减少资源消耗和尽可能解决所带来的环境问题，而产品设计方案决定了资源的利用率和对环境的影响程度，所以应进行绿色设计。但各种设计方案对环境的影响和资源消耗不同，所产生的企业经济效益和社会效益也不一样，各有其优势，也存在不足。为了找到各方面都较满意的设计文案，本文建立了一个设计方案选优的 0-1 型目标规划模型，进行方案选优。通过模型求解，可以考察各目标的实现程度及其差距，还有利于指导企业改进产品设计。但限于资料和篇幅所限，本文没有给出相应的优选实例。

参考文献：

- [1] Kongar, E. and Gupta, S.M.. A Goal Programming Approach to the Remanufacturing Supply Chain Model. Proceedings of the SPIE International Conference on Environmentally Conscious Manufacturing (Vol.4193), 167-178, 2000.
- [2] 谢家平等. 装配式产品回收处理逆向物流的成本—效益分析模型[J]. 中国流通经济, 2003, (1).
- [3] 谢家平等. 绿色设计系统分析与系统评价[J]. 江西社会科学, 2003, (3).
- [4] 谢家平等. 实施绿色制造是提高企业市场竞争力的战略举措[J]. 企业经济, 2003, (1).
- [5] 郝英奇, 谢家平等. 运筹学[M]. 北京: 地震出版社, 1998.

(责任编辑: 董小玉)