

基于递推算法的生命周期评价清单分析应用研究

方 宁

(安徽工业大学 计算机科学与技术学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘 要: 清单分析是生命周期评价方法的核心部分。常见的生命周期评价清单分析计算方法主要基于物料平衡原理, 对各单元过程的物质流建立矩阵模型进行关联分析。此计算过程可简化数据复杂度, 得出较为准确的数据值。但对于清单结果的量化汇总往往容易忽略其重要性, 从而影响后续的评价分析步骤。针对该问题, 可运用递推算法将各单元过程输入流、输出流的数值结果进行汇总分析, 通过遍历数据类型进行影响类型整合, 为后续确定影响评价步骤奠定扎实的基础。

关键词: 清单分析; 生命周期评价; 矩阵模型; 高斯消元法; 递推算法; 影响评价

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 2095-1302 (2022) 08-0074-04

0 引 言

随着社会的不断发展, 人们对生活质量的要求越来越高, 当人们对自然资源不加控制的使用时, 工业生产所带来的气候变化、颗粒物、垃圾堆积等一系列环境问题却总是被忽视。科学研究表明, 碳排放量的上升是造成全球气候变暖、温室效应, 甚至出现极端不良气候的直接诱发因素之一^[1], 并正在危及人类的健康和生活质量。在此背景下, 怎样减少碳排放量已成为各国学者和专家关心的议题。

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 作为一种面向产品系统的环境影响分析工具, 它以系统的思维方式去研究产品 (或服务) 在全生命周期中各阶段的投入消耗以及环境排放问题, 能够定量评价和辨识改善环境影响的方案^[2]。不少学者和专家都应用 LCA 方法来检测产品或工艺的环境排放问题, 并取得了高效的评估结果, 使得工业生产中的碳排放情况得到了改善。杨毅^[3]等人利用 LCA 理论研究制备氧化铝的工艺, 通过不同的发电方式对原铝进行生命周期的环境影响评估, 从而采取相应措施降低对环境的影响。时君丽^[4]等人基于 LCA 理论建立能耗、物耗及环境排放模型, 并通过特征化和标准化方式得出环境影响类别, 从而减少相应工艺过程中的资源、能源消耗和环境排放, 实现绿色制造。Strecker^[5]等通过对 GREET 模型的研究, 利用高效的动力系统实现了能源节约和碳排放改善的目的, 并实现了太阳能发电站的排放量控制。S Pfister^[6]等开发了一种评估淡水消耗对环境影响的方法, 并与 Eco-indicator-99 LCIA 方法相结合, 为水密集型产品生产中出现的环境问题提供参考。

邓超^[7]等以矩阵的形式建立了理论模型, 验证了算法的准确性。

LCA 因其利用率较高, 已经被广泛应用在各行各业。清单分析的结果对产品的影响评价至关重要, 如果没有对数据进行准确的计算和高效的整合处理, 就无法使相关人员对此清单数据的影响评价类型进行准确划分。针对这一现象, 本文先选用矩阵模型的算法对数据进行计算, 并运用高斯消元法进行求解, 降低数据计算的复杂度, 最后提出递推算法将系统数据进行汇总, 清晰展现该产品的各类环境影响潜值, 方便后续程序顺利进行。

1 清单分析步骤

ISO 14040 标准规定, LCA 的技术框架分为四个阶段: 目的和范围的确定^[8]、清单分析^[9]、影响评价^[10]、结果解释^[11]。其中, 清单分析阶段的数据准确性会直接影响目标产品或工艺的环境特性评价。因此, 清单分析阶段的数据计算十分重要。

建立清单的过程即在系统范围内, 对于产品全生命周期中各阶段的单元过程输入、输出数据, 根据产品给定的功能单位进行定量整理。生命周期评价清单分析阶段主要包含数据收集准备、数据收集、数据计算三部分。

数据收集准备阶段: 根据产品全生命周期所经历各阶段, 绘制产品生命周期主流程图, 并依据生命周期主流程图中各阶段的不同特性, 再将相应的阶段细分为子流程图。各流程图中的每个阶段均称为单元过程, 每个单元过程都包含多个输入流和输出流, 如图 1 所示。

数据收集: 清单分析需要大量数据基础, 在产品系统边界中, 清单数据可根据以下几种类型进行分类:

收稿日期: 2021-10-27 修回日期: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (61806005)

- (1) 能源与资源输入、原材料输入、辅助性输入、其他实物输入；
- (2) 产品、共生产品和废物；
- (3) 向空气、水体和土地排放的污染物；
- (4) 其他环境因素^[12]。



图1 单元过程示例图

这些数据有时可以从公开出版物中搜索和收集，但大多数情况下，单元过程的输入和输出数据都很难从文献出版物中全部获得，因此大多数数据需要从企业工厂中获取，再与单元过程相结合。

数据计算：根据产品工艺流程图中各单元过程，按给定功能单位找出基本流与主物质流间的关联关系，并根据相应数据模型，对产品系统中每一单元过程采用的方法进行简化，最后将清单结果准确展示。

2 清单分析算法

在清单数据分析中，通常需要遵循物料平衡原理^[13]。所谓物料平衡，在工业生产中主要是指原材料的平衡，即产出品中含有的物料应当与投入品相等。二者之间形成物料平衡，可以从源头避免一些由于物料不平衡造成的原材料遗失，同时也能保证产品或工艺流程中数据清单的完整性。因此，本文将物料平衡原理代入清单分析中，对数据进行矩阵建模，并运用递推法将各单元过程进行同类数据汇总，最终完成清单列表。

2.1 基于物料平衡原理的矩阵模型分析

产品的生命周期流程图一般包含多个单元过程，每个单元过程都有多个带有实际数值的输入、输出物质流，建立合适的数据计算模型是清单分析的重点。因此，我们选用矩阵模型分析的方式进行数据计算。为方便流数据的计算，在建立流程图各单元过程间的联接关系时，需要选定一个主输入流和主输出流，其他物质流数值根据主物质流生成相对值。假设输入流为 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，输出流为 $y_j (j=1, 2, \dots, n)$ ，输入流 X_i 的实际数值流用 $V_{xi} (i=1, 2, \dots, n)$ 表示，输出流 y_j 的实际数值流用 $V_{yj} (j=1, 2, \dots, n)$ 表示。选择 X_1 作为主输入流， y_1 作为主输出流，则其他物质流可参照主流生成相对数值，这里以主输入流 X_1 作为参照流，相对应的参照流数值为 V_{x1} ，则其他物质流与参照流生成的比例关系可表示为

$$1 : V_{x2}/V_{x1} : \dots : V_{xn}/V_{x1} : V_{y1}/V_{x1} : V_{y2}/V_{x1} : \dots : V_{yn}/V_{x1}$$

根据上述比例关系可以建立矩阵模型：

$$\begin{bmatrix} 1 \\ V_{x2}/V_{x1} \\ \vdots \\ V_{xn}/V_{x1} \\ V_{y1}/V_{x1} \\ V_{y2}/V_{x1} \\ \vdots \\ V_{yn}/V_{x1} \end{bmatrix} * x_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据公式(1)可得出主输入流 X_1 与主输出流 y_1 之间的关系方程： $(V_{y1}/V_{x1}) * X_1 = y_1$ 。假设工艺流程图中存在 N 个主物质流，并设定主物质流为 $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，基于产品工艺流程的物料平衡原理，其中 $N-1$ 个方程的一般方程式为 $a_{ij}f_i - f_j = 0$ (其中 a_{ij} 为主流 f_i 的相对量， $j=1, 2, \dots, n$ ，且 $i \neq j$)，而第 N 个方程由系统指定的功能单位给出，则有方程式

$$\sum_{i=1}^n c_i f_i = F, \quad \text{式中 } c_i \text{ 是主物质流 } f_i \text{ 的相对量系数, } F \text{ 是系统给定的功能单位。由此可见, 该方程组可通过矩阵的数据模型表示, 如公式(2)所示:}$$

$$A_{n \times n} * X = B \quad (2)$$

式中, $A_{n \times n}$ 为 c_i 和 a_{ij} 的 $n \times n$ 阶矩阵, $X = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$, $B = [F, 0, \dots, 0]^T$, 因此可以得出下式:

$$X = F * A_{n \times n}^{-1} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据逆矩阵公式 $A_{n \times n}^{-1} = A_{n \times n}^* / |A_{n \times n}|$, 得出:

$$A_{n \times n}^* = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

进而得出:

$$X = \left(F * \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & \dots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \dots & A_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \right) / |A_{n \times n}| = \left(F * \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ \vdots \\ A_{1n} \end{bmatrix} \right) / |A_{n \times n}| \quad (5)$$

式中, 伴随矩阵 $A_{n \times n}^*$ 中的元素 A_{ij} 为矩阵 $A_{n \times n}$ 中第 i 行第 j 列元素的代数余子式; $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1n}$ 均为 $n-1$ 阶行列式; $|A_{n \times n}|$ 为 n 阶行列式; 运用高斯消元法进行行列式求解得到 X 唯一值, 即求得主流变量。通过公式(1)的基本流比例关系, 可成功求解出各单元过程的基本流情况。

2.2 基于递推算算法的清单数据汇总

在系统流程图中, 各单元过程、工艺流程以及外界环境之间的联接关系如图2所示。

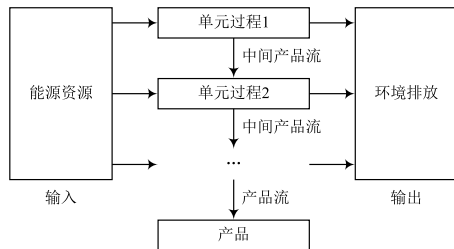


图2 产品过程流

一般情况下，清单分析的计算结果为系统与环境之间的输入输出数据，即基本流数据。当基于物料平衡原理求解出各单元过程的输入流和输出流之后，将各单元过程的基本流数据汇总即可得出清单分析结果，再根据清单结果进行资源、能源和环境影响分析，得出产品或工艺的环境影响特性。

假设系统中有 N 个单元过程, 则第 i 个单元过程的第 j 个物质流可定义为 X_{ij} ($j=1, 2, \dots, K_i; i=1, 2, \dots, N$), 系统中每个单元过程的基本流数量不一, K_i 为变量, 代表第 i 个单元过程中基本流的总数量, N 表示系统中所有单元过程的总数量。一个系统中, 每个单元过程之间可能含有相同类型的基本流, 因此, 我们将 M 设为系统中所有单元过程基本流的交集, 则有:

```

var  $M = \phi$ 
  for var  $i = 1$  to  $N$  by 1 do
     $X_i = \phi$ 
  end
  for var  $j = 1$  to  $N$  by 1 do
    for var  $k = i+1$  to  $N$  by 1 do
       $M_i = X_i \cap X_k$ 
       $M_j = M_i \cup M$ 
       $M = M \cup M_j$ 
    end
  end
end

```

设第 i 个单元过程中的基本流集合 X_i 减去子集 R 后, 用 $X_i (i=1, 2, \dots, N)$ 表示, 并且将系统中 N 个单元过程的总基本流集合用 T 表示, 则 T 可用递推算法计算得出:

```

var T=M
for var i = 1 to N by 1 do
    R=T ∩ Xi
    Xi=Xi-R
    T=T ∪ Xi
end

```

通过上述计算, 我们可以建立 S 种基本流, N 个单元过程的矩阵, 并将其表示为 $D_{S \times N}$, 其中 S 为 T 中的基本流数量, 而矩阵中第 i 个单元第 j 个物质流的实际数值用 $d_{i \times j}$ 表示。任意单元过程中的所有基本流以 $G_{i \times j}$ ($j=1, 2, \dots, K_i; i=1, 2, \dots, N$) 表示, 单元过程中的基本流实际数值用 $g_{i \times j}$ 表示, 由此关系可推出清单汇总算法为:

```

var  $D_{S \times N} = 0$ 
for var  $i = 1$  to  $N$  by 1 do
    for var  $j = 1$  to  $S$  by 1 do
        if  $d_{j \times i} \exists G_{i \times j}$ 
        then  $d_{j \times i} = g_{i \times j}$ 
        elseif
            then  $d_{j \times i} = 0$ 
        end
    end
end

```

当矩阵中的所有元素都被 N 个单元过程的基本流数值替换或设置完成后,可按自上而下的顺序依次进行每行数值量化计算,即可得出最终的清单分析结果。

2.3 算法论证

基于上述理论算法与原理, 以一个瓦楞纸箱的全生命周期作为测试案例, 如图 3 所示。参照上述方法过程, 进行案例的清单分析。

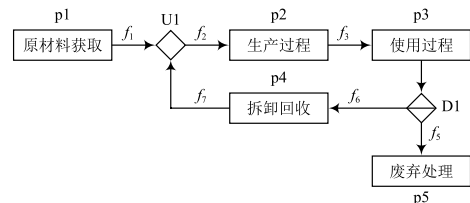


图3 瓦楞纸箱全生命周期流程

根据瓦楞纸箱的全生命周期过程，将它分为 5 个单元过程，即原材料获取、生产过程、使用过程、拆卸回收过程和废弃回收过程。单元过程之间的物质流连接用 f_i 表示，U1 为物质流汇总标志，D1 为分流标志。

瓦楞纸箱清单数据见表 1、表 2 所列, 根据清单计算方法与数据汇总分析得出清单结果列表见表 3、表 4 所列。结合汇总数据, 得到各影响类型的评价结果, 以二氧化碳为例, 如图 4 所示。

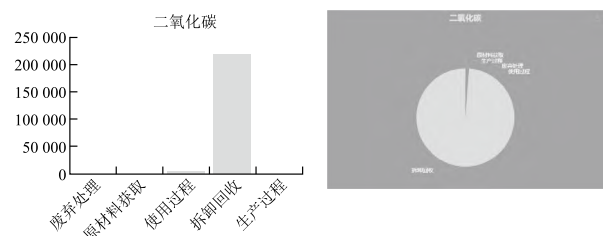


图 4 二氧化碳影响结果显示

表1 瓦楞纸箱全生命周期各阶段资源、能源投入

名 称	原材料 获取 /kg	生产 过程 /kg	使用 过程 /kg	拆卸 回收 /kg	废弃 处理 /kg
瓦楞纸箱	—	—	3.99	2.09	—
硬煤	—	89.56	—	—	—
水	—	831.92	—	—	—
垃圾焚烧发电	—	—	—	—	6.789 (MJ)
印刷油墨	—	4.0	—	—	—
水稻	110	—	—	—	—
钉	0.62	—	—	—	—
淀粉	8.665 5	8.47	—	—	—
NaOH	0.98	0.84	—	—	—
乳胶	11.023 5	10	—	—	—

表2 瓦楞纸箱全生命周期各阶段环境排放

名 称	原材料 获取 /kg	生产 过程 /kg	使用 过程 /kg	拆卸 回收 /kg	废弃 处理 /kg
溴氯二氟 甲烷	—	0.367	—	—	—
一氧化氮	—	0.978	—	—	—
废水	—	698.67	—	—	—
烟尘	—	1.83	—	—	—
一氧化碳	—	—	0.453	—	—
二氧化硫	—	—	0.783 7	—	—
二氧化碳	—	—	0.629	0.09	0.987 6

表3 瓦楞纸箱全生命周期过程资源、能源投入

物质流名称	原材料获取 /kg	生产过程 /kg	使用过程 /kg	拆卸回收 /kg	废弃处理 /kg	总 计 /kg
瓦楞纸箱	—	—	1.616 018 5e+4	5.076 886 1e+6	—	5.093 046 3e+6
硬煤	—	3.639 128 6e+5	—	—	—	3.639 128 6e+5
废纸	—	1.984 739 1e+6	—	—	—	1.984 739 1e+6
水	—	3.380 375 0e+6	—	—	—	3.380 375 0e+6
垃圾焚烧发电	—	0	—	—	6.789 0e+0(MJ)	6.789 0e+0(MJ)
印刷油墨	—	1.625 336 6e+4	—	—	—	1.625 336 6e+4
水稻	1.865 041 2e+8	—	—	—	—	1.865 041 2e+8
钉	1.051 205 0e+6	—	—	—	—	1.051 205 0e+6
淀粉	1.469 228 6e+7	—	3.441 650 2e+4	—	—	1.472 670 3e+7
NaOH	1.661 582 2e+6	—	3.413 206 8e+3	—	—	1.664 995 4e+6

表4 瓦楞纸箱全生命周期过程环境排放

名 称	原材料获取 /kg	生产过程 /kg	使用过程 /kg	拆卸回收 /kg	废弃处理 /kg	总 计 /kg
溴氯二氟甲烷	—	1.491 246 3e+3	—	—	—	1.491 246 3e+3
一氧化氮	—	3.973 947 9e+3	—	—	—	3.973 947 9e+3
废水	—	2.838 934 8e+6	—	—	—	2.838 934 8e+6
烟尘	—	7.435 914 9e+3	—	—	—	7.435 914 9e+3
一氧化碳	—	—	1.834 727 8e+3	—	—	1.834 727 8e+3
二氧化硫	—	—	3.174 119 5e+3	—	—	3.174 119 5e+3
二氧化碳	—	—	2.547 558 0e+3	2.186 218 9e+5	9.876 730 0e-1	1.706 673 0e+0

3 结 语

清单分析是 LCA 的推动力,也是生命周期影响评价的基础。本文根据产品系统所设定的功能单位初始值,对系统流程图中所有单元过程的物质流数值,基于物料平衡原理采用矩阵模型进行分析,并运用高斯消元法简化计算复杂度,得出输入、输出流的数据清单。在此基础上运用递推原理,根据相邻单元过程之间的物质流关系,对产品或工艺所包含

的物质流类型进行整理,并对各单元过程的数据进行汇总分析,最终得出准确清晰的清单分析结果,为工业生产过程中的影响评价和改善方法提供了较好的理论和实践基础。

参 考 文 献

- [1] 杨璐. 浅谈我国降低碳排放量的对策[J]. 长春教育学院学报, 2021, 28 (8): 56-57.

(下转第 80 页)



图5 演示结果

参考文献

- [1] 张锋, 温鸿天, 黄镇宏, 等. 基于物联网技术的人体云健康监护及预警系统[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(6): 1898-1901.
- [2] HILL J L, CULLER D E. Mica: A wireless platform for deeply embedded networks[J]. IEEE Micro, 2002, 22(6): 19-30.
- [3] 张骏. 居民电子健康档案的应用和完备[J]. 中国医药科学, 2012, 2(5): 166-167.
- [4] 陆云帆. Oracle 数据库设计与实验[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 李增亮, 徐崧, 闫立强, 等. 基于嵌入式和 Qt 的屏蔽泵远程监

- 控系统设计[J]. 仪器仪表用户, 2021, 28(9): 17.
- [6] 薛冰冰, 吴书裕, 李亚萍, 等. 基于 STM32 的微型多参数健康监护终端的设计[J]. 电子技术应用, 2014, 40(2): 12-15.
- [7] 梁胤程, 杨峰, 徐昕军. 基于智能手机的安全监护系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(10): 42.
- [8] 何宗见, 詹国华, 李志华. 基于 Android 平台多生理参数检测系统设计与实现[J]. 杭州师范大学学报, 2013, 12(6): 567-573.
- [9] 刘丹, 何南, 刘茂, 等. 基于 ZigBee 技术的老年人远程保健监护系统设计[J]. 物联网技术, 2019, 9(11): 54-56.
- [10] 黄永健, 王伟, 谢广明, 等. 物联网家庭健康监护系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(11): 87-90.

作者简介: 梁家耀(1999—), 男, 本科, 嵌入式工程师, 研究方向为嵌入式开发。

向荣(1969—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为计算机应用技术。

(上接第 77 页)

- [2] 李顺兴, 郑凤英, 邓南圣. 面向产品系统的环境管理工具: 生命周期评价[J]. 漳州师范学院学报(自然科学版), 2004, 17(3): 78-83.
- [3] 杨毅, 郭尧琦, 朱文松, 等. 基于生命周期评价的我国原铝生产的环境影响评估[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2019, 29(8): 1784-1792.
- [4] 时君丽, 关朋朋, 周茂军, 等. 基于 LCA 的机床切削单元能耗及环境排放研究[J]. 机械设计与自动化, 2017, 46(3): 14-16, 48.
- [5] STRECKER B, HAUSMANN A, DEPCIK C. Well to wheels energy and emissions analysis of a recycled 1974 VW super beetle converted into a plug-in series hybrid electric vehicle[J]. Journal of cleaner production, 2014, 68(apr.1): 93-103.
- [6] PFISTER S, KOEHLER A, HELLWEG S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. [J]. Environmental science & technology, 2009, 43(11): 4098-104.
- [7] 邓超, 夏添, 吴军. 产品生命周期评价原型系统设计和开发[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(9): 9.
- [8] International Organization for Standardization.ISO 14040 environmental management-life cycle assessment-principles

- and framework [S]. Geneva: Inter national Organization for Standardization, 1997.
- [9] International Organization for Standardization.ISO 14041 environmental management-life cycle assessment-goal and scope definition and inventory analysis [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [10] International Organization for Standardization.ISO 14042 environmental management-life cycle assessment-life cycle impact assessment [S]. Geneva: International.Organization for Standardization, 2000.
- [11] International Organization for Standardization.ISO 14043 environmental management-life cycle assessment-life cycle interpretation [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2000.
- [12] 陈亮, 刘玫, 黄进.GB/T24040—2008《环境管理生命周期评价原则与框架》国家标准解读[J]. 标准科学, 2009, 46(2): 76-80.
- [13] 李英祥. 基于粒子群算法的拜耳法物料平衡计算研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.