

硕 士 学 位 论 文

基于多种清单分析方法的压缩机转子 生命周期评价

**Life Cycle Assessment of Compressor Rotors Based on Multiple
Inventory Analysis Methods**

作 者 姓 名: _____ 王 亮 _____

学 科、 专 业: _____ 机械设计及理论 _____

学 号: _____ 21404152 _____

指 导 教 师: _____ 李 涛 副教授 _____

完 成 日 期: _____ 2017 年 6 月 1 日 _____

大连理工大学

Dalian University of Technology

摘 要

随着环境和资源问题的日益严峻,生态设计、绿色制造以及清洁生产等技术在国内外得到了广泛关注。而生命周期评价(LCA)作为一种评估产品、工艺过程或活动环境影响客观有效的方法,已经得到了人们广泛的研究和应用。压缩机是一种广泛应用于各行业的重要工业装备,对大型离心压缩机转子在整个生命周期内的资源、能源消耗和环境影响进行综合评价和分析,并给出合理的改进措施,具有重要的现实意义。

本文首先阐述了研究背景,回顾了生命周期评价方法、软件工具以及机械产品生命周期评价国内外研究现状,介绍了研究意义和研究内容。然后详细分析了当前生命周期评价的主要方法,包括基于过程的生命周期评价,基于投入产出的生命周期评价,混合生命周期评价,并针对混合方法中的数据重复问题进行了改进。接下来基于过程生命周期评价方法对压缩机转子各生命周期阶段进行了详细的清单分析和环境影响评价,包括原材料生产、原材料运输、转子生产、转子运输、使用和废弃处理。评价结果表明:压缩机转子使用阶段的综合环境影响占整个生命周期阶段的 75%,叶轮生产的综合环境影响占整个生产阶段的 89.4%,铣削工艺的综合环境影响占叶轮生产的 86.7%。

本文分别基于投入产出分析和三种混合分析模型进行了压缩机转子的生命周期清单分析和环境影响评价,对比分析了不同模型环境影响结果的差别和原因,提出了生命周期评价方法的选取准则。集成混合模型充分考虑了过程系统和国民经济的上、下游部门之间的双向关系,对数据收集要求最高,在三种混合分析方法计算的结果中最大,与 P-LCA、TH-LCA 和 IOH-LCA 相比分别增大 57%、16%、24%。

本文基于不确定性分析和敏感性分析对数据质量进行了评估,得出基于过程数据的结果更加准确,可信度更高。压缩机转子的使用时间和价格对 LCA 结果的敏感性很大。根据清单分析结果和环境影响评价结果,分别针对压缩机转子的生产阶段、运输和使用阶段以及废弃处理阶段进行了环境改善分析,生产阶段主要是减少原材料和能源的消耗,运输阶段的重点是减少汽车尾气排放。使用阶段的主要措施是提高压缩机效率和优化电力结构。对比分析了整体填埋、回收利用和再制造三种方案的环境影响,与整体填埋相比,再制造在 PED、GWP、AP、EP、POCP 分别减少 33%、31%、31%、31%、44%。

本文还设计和开发了具有过程生命周期评价和投入产出生命周期评价功能的原型软件系统,实现了部分中国产品数据清单和环境影响权重的导入。本文最后对研究的主要成果进行了总结,同时分析了研究的不足,并对未来的研究进行了展望。

关键词: 生命周期评价; 压缩机转子; 混合生命周期评价; 投入产出分析; 数据库

Life Cycle Assessment of Compressor Rotors Based on Multiple Inventory Analysis Methods

Abstract

With the increasingly severe environmental and resources problems, various techniques have been widely concerned at home and abroad, such as ecological design, green manufacturing and cleaner production, and so on. Life Cycle Assessment (LCA) which is an effective and objective method to evaluate the environmental impact of product, process or activity has been studied intensively and applied widely. The compressor is a kind of important industrial equipment which is widely used in various industries. A comprehensive evaluation and analysis of the resources, energy consumption and environmental emissions in the whole life cycle of a large centrifugal compressor, and gives some reasonable improvement measures, which has important practical significance.

This paper first elaborates the research background, reviews the research status of life cycle assessment methods, software tools and life cycle assessment of mechanical products at home and abroad, introduces research meaning and research contents. Then, the main LCA methods are analyzed, including process-based LCA, input-output-based LCA and hybrid LCA. And the problem of data double-counted in hybrid LCA is improved. Next, the life cycle inventory analysis and life cycle impact assessment are conducted for the compressor rotor based on process life cycle assessment method in detail, including raw materials production, raw materials transportation, rotor manufacture, rotor transportation, use and disposal. The evaluation results show that the comprehensive environmental impact of the compressor rotor usage stage occupies 75% of the whole life cycle stage. The comprehensive environmental impact of impeller production accounts for 89.4% of the total production stage. The comprehensive environmental impact of milling process accounts for 86.7% of impeller production.

The life cycle inventory analysis and life cycle impact assessment are conducted for the compressor rotor based on input-output analysis and three hybrid analysis models, the differences and causes of the environmental impacts of different models are compared and analyzed. Some guidelines are proposed for the using and selection of LCA methods. The integrated hybrid model takes full account of the two-way relationship between the process system and the upper and lower sectors of the national economy. The data collection requirements are the highest, and the results among the three hybrid analysis methods are the

highest. Compared with P-LCA, TH-LCA and IOH-LCA methods, the results of IH-LCA increase by 57%, 16% and 24%, respectively.

This paper evaluates the data quality based on the uncertainty analysis and sensitivity analysis concluding that results from process data are more accurate and more reliable. The use time and price of the compressor rotor are very sensitive to the LCA results. According to the results of life cycle inventory analysis and environmental impact assessment, the environmental improvement analysis of the rotor production, transportation, usage and end-of-life disposal stages are conducted respectively. In the production stage, the main measure is reducing the consumption of raw materials and energy. The focus of the transport phase is to reduce the automobile exhaust emissions. In the usage stage, the main measures are improving the efficiency of the compressor and optimizing the power structure. The environmental performances of three waste treatment schemes (whole landfill, recycling and remanufacturing) are compared and analyzed. Compared with the whole landfill, remanufacturing decreased by 33%, 31%, 31%, 31% and 44% in PED, GWP, AP, EP and POCP respectively.

This paper also designs and develops a prototype software system with process life cycle assessment and input-output life cycle assessment, and import some Chinese product data inventory and environmental impact factors. At the end of this paper, the main research achievements are summarized, the deficiencies of the research are analyzed and the future research is prospected.

Key Words: Life Cycle Assessment; Compressor Rotor; Hybrid Life Cycle Assessment; Input-Output Analysis; Database

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
1 绪论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.1.1 资源和环境问题.....	1
1.1.2 生命周期评价.....	1
1.1.3 机械产品对 LCA 的需求.....	3
1.2 国内外研究现状.....	4
1.2.1 生命周期评价方法研究现状.....	4
1.2.2 LCA 软件工具研究现状.....	5
1.2.3 机械产品生命周期评价研究现状.....	8
1.3 本课题研究意义和目的.....	10
1.4 课题来源.....	11
1.5 研究内容.....	11
2 生命周期评价方法分析与改进.....	13
2.1 基于过程的生命周期评价(P-LCA).....	13
2.2 基于经济投入产出的生命周期评价(IO-LCA).....	14
2.2.1 投入产出分析.....	14
2.2.2 投入产出表基本结构.....	15
2.2.3 IO-LCA	17
2.3 混合生命周期评价(H-LCA).....	18
2.3.1 层次混合分析模型.....	18
2.3.2 基于投入产出的混合分析模型.....	20
2.3.3 集成混合分析模型.....	21
2.4 LCA 方法比较.....	23
2.5 本章小结.....	25
3 基于过程清单分析的压缩机转子生命周期评价.....	26
3.1 研究目标和范围.....	26
3.1.1 研究对象.....	26
3.1.2 研究目标.....	26

3.1.3	系统边界	27
3.1.4	假设条件	28
3.1.5	数据收集方法	28
3.2	生命周期清单分析	28
3.2.1	生产阶段	28
3.2.2	运输和使用阶段	34
3.2.3	废弃处理阶段	35
3.2.4	全生命周期清单结果	36
3.3	生命周期影响评价	37
3.3.1	生命周期影响评价建模	37
3.3.2	生命周期影响评价方法的选择	40
3.3.3	转子生命周期阶段环境影响评价	41
3.3.4	转子生产阶段环境影响评价	43
3.3.5	叶轮加工过程环境影响评价	44
3.4	本章小结	46
4	基于混合清单分析的压缩机转子生命周期评价	47
4.1	压缩机转子投入产出生命周期清单分析	47
4.2	压缩机转子的混合清单分析	49
4.2.1	压缩机转子的层次混合清单分析	49
4.2.2	压缩机转子基于投入产出混合清单分析	50
4.2.3	压缩机转子的集成混合清单分析	52
4.3	不同方法的压缩机转子 LCA 结果比较	54
4.4	本章小结	56
5	生命周期结果解释	58
5.1	不确定性分析	58
5.1.1	参数不确定性程度评估	59
5.1.2	蒙特卡洛模拟	59
5.1.3	不确定参数的概率分布函数	60
5.1.4	不确定性分析结果	60
5.2	敏感性分析	62
5.3	压缩机转子生命周期环境改善分析	63
5.3.1	生产阶段环境改善分析	63

5.3.2	运输和使用阶段环境改善分析	63
5.3.3	废弃处理阶段环境改善分析	64
5.4	本章小结	65
6	生命周期评价原型系统设计	66
6.1	LCA 数据库设计	66
6.1.1	LCA 数据库模型分析	66
6.1.2	LCA 数据库设计实现	67
6.2	LCA 软件设计	71
6.2.1	开发环境	71
6.2.2	关系型数据库	72
6.2.3	系统总体设计	72
6.2.4	系统功能的实现	73
6.3	本章小结	75
结 论		76
参 考 文 献		78
攻读硕士学位期间发表学术论文情况		82
致 谢		83
大连理工大学学位论文版权使用授权书		84

1 绪论

1.1 课题背景

1.1.1 资源和环境问题

在过去的几十年里,中国经济创造了举世瞩目的成就,如今已经成为世界第二大经济体。然而快速的工业化和城市化进程给资源和环境造成了巨大压力,而且一直以来中国走的都是粗放型的经济发展道路,是以牺牲资源和环境为代价。面对资源趋紧、环境污染和生态系统退化等问题,中国已经将生态文明建设上升到前所未有的高度^[1]。

根据联合国环境规划署 2013 年的报告显示,中国是世界上最大的原材料消耗国,是消耗量排名第二的美国的四倍之多^[2]。另外根据中国科学院可持续发展战略研究组 2014 年的报告显示,2012 年中国消耗了世界上 50.2%的煤炭,55.4%的铁矿石,55%的水泥,44%的常用有色金属,这些比例远远超过了当年中国 GDP 占世界经济的 11.4%这一比例^[3]。中国的石油、矿石以及有色金属等资源需要大量进口,特别是矿产资源正从少数矿种依赖进口向着全面依赖进口的方向发展^[4]。

中国的环境污染物排放量同样居世界首位,近些年来随着我国环境治理力度的不断加大,污染物排放总量一直处于下降趋势,但是仍然远远超出环境容量,局部改善的同时,环境质量总体仍在恶化,形势不容乐观^[1]。大气污染的主要原因是大量废气的排放,2014 年全国氮氧化物(NO_x)排放总量为 2078.0 万吨,二氧化硫(SO_2)排放总量为 1974.4 万吨,超出环境容量的 64.5%。大量污染物的排放使环境污染出现了复合型,例如近几年中国北方频发的雾霾天气,严重影响了人们的日常生活和身体健康,甚至有研究表明雾霾天气导致中国北方人比南方人的寿命减少五年半^[5]。水体污染情况更加严重,2014 年全国废水排放总量为 7161751 万吨,其中化学需氧量(COD)排放总量为 2294.59 万吨,超出环境容量的 192%,而氨氮排放总量达到了 238.53 万吨,超出环境容量的 699%。另外一些其他环境污染问题包括汞污染、持久性有机物、挥发性有机化合物等也非常严重。

1.1.2 生命周期评价

生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)作为一种评估产品、工艺过程或活动相关环境因素客观有效的工具,已经在企业产品开发和改进、政府政策制定、环境管理和决策分析等领域得到了广泛的研究和应用,成为实施生态设计、绿色制造、清洁生产、节能减排以及环境标准制定的关键技术。LCA 考虑了产品在整个生命周期内的环境表

现，从原材料的开采和生产一直到产品的最终废弃处置过程中的所有阶段，可以定量评估产品在每个生命周期阶段的能源和材料消耗以及固体、气体和液体废物排放^[6]。因此，LCA 可以帮助生产者在成本收益最佳条件下，节约材料、能源和资源的使用，以更小环境影响目标来改进产品；帮助政府制定和实施环境管理政策和规划。

为了统一生命周期评价方法，国际环境毒理学与化学学会（SETAC）和国际标准化组织（ISO）先后规定了生命周期评价的技术框架。ISO 确立了 ISO14000 系列标准，其中 ISO14040 标准（环境管理—生命周期评价的原则与框架）规定了生命周期评价的技术框架包括四个相互关联的部分：目标与范围定义、清单分析、影响评价、以及结果解释^[7]，如图 1.1 所示。

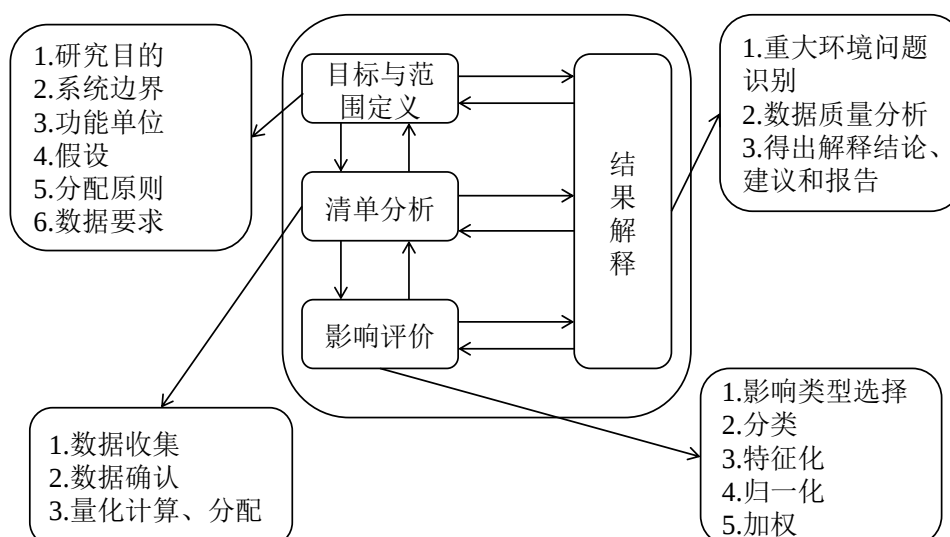


图 1.1 生命周期评价技术框架

Fig.1.1 The framework of life cycle assessment

（1）目标与范围定义

目标与范围的定义是生命周期评价中至关重要的一步。在这一阶段，需要确定以下内容：定义和描述所研究的产品、过程或活动，确定研究的目标，确定研究的范围，确定研究工作的基本原则，确定所需的特征和信息类型，确定结果的精确程度，确定应该如何组织数据和结果显示以及如何解释结果才更有意义。

（2）清单分析

清单分析是生命周期评价中识别和量化一个给定产品系统在整个生命周期过程中

所有的输入和输出的一个环节，输入包括能源和原材料，输出包括气体排放、液体排放以及固体废弃物。因此，产品生命周期清单结果提供了各单元过程、阶段和整个生命周期的详细的能量流、物料流和废物流。清单分析通常分为四步：建立生命周期过程流程图，制定数据收集计划，数据收集，评估和报告清单结果。

（3）影响评价

影响评价的目的是评估在清单分析阶段所确定的能源和材料的使用以及环境排放对资源、人体和生态的潜在影响，建立产品或过程与其潜在环境影响之间的联系。影响评价通常包括以下几步：选择和定义影响类型、分类、特征化、归一化、分组、加权、评估和报告影响评价结果。

（4）结果解释

结果解释是根据数据的不确定性和所作的假设条件对清单分析结果和影响评价结果进行识别、量化、检查以及评估，为环境效率和绿色设计提供依据。结果解释一般包括以下内容：识别产品的薄弱环节，完整性、敏感性和一致性检查，形成结论、建议和报告。

1.1.3 机械产品对 LCA 的需求

机械制造行业是我国国民经济的支柱产业，为社会提供了大量的生产资料和丰富的产品，然而这种传统行业存在高能耗、高自然资源消耗和多种环境污染物排放等问题。能源价格的提高、材料的可获得性和环境政策的压力促使制造企业采取各种措施减少材料和能源消耗，特别是对机械设备制造企业。对于汽车行业，燃油短缺、尾气排放和交通堵塞是其主要问题，近些年来，随着汽车数量的迅速增长，由其引起的环境问题日益显著，企业开始逐渐重视开发能耗少、排放低、材料回收利用率高的汽车。对于家电行业，生产高效节能的绿色产品是其主要目标，优化结构、采用绿色材料和绿色工艺等降低家电产品的环境影响。电机是一种使用非常广泛的高耗能产品，其耗电量约占全国总用电量的 60%^[8]，电机的运行效率、制造技术和工艺等方面都具有较大的优化空间。机床运行过程中会消耗大量能源，然而真正用于切削金属的能耗要远低于辅助功能的能耗和运行过程中其他形式的损耗，而且废旧机床的大部分零部件具有较高的再制造价值。

压缩机属于通用机械，应用范围非常广泛。压缩机按工作原理可以分为透平式压缩机和容积式压缩机，透平式压缩机又细分为离心式和轴流式两种。离心式压缩机的工作介质是气体，经过叶轮转化为流体压力，具有排气压力大、排量大、运行可靠、结构紧凑、气质清洁、转速高、适用范围广等优点。西气东输是世界上最长的跨国天然气输送管道工程，也是国家高度重视的重点工程。为了保障国家能源安全和降低成本，西气东

输工程的长输管线设备被列入国产化的重点，而用来压缩和输送天然气的大型离心式压缩机组是天然气输气管道动力供给场站的核心设备，是衡量一个国家重大装备制造水平的标志性设备之一。沈阳鼓风机有限公司是压缩机行业的龙头企业，先后推出了大型长输管线压缩机、大型百万吨乙烯压缩机、大型炼油和煤化工等压缩机，填补了国内空白。大型离心式压缩机生产过程中不仅会消耗大量资源和能源，而且会排放大量污染物，压缩机服役过程中又会产生巨大的电量消耗，这些给压缩机生产企业和用户带来了很大的环境压力。

机械产品实施生态设计、绿色制造、清洁生产、节能减排以及环境标志认证的关键是对产品、工艺过程或活动的能源消耗和环境影响进行综合分析和评价。其中，III型环境标志是完全基于 LCA 方法的产品环境影响声明，是绿色采购和环境管理最有力的支持工具。与 I 型和 II 型环境标志相比，III型环境标志基于 LCA 方法将产品环境影响行为指标化，可以提供更科学和具有可对比性的产品环境影响信息，因此越来越受到世界各国的重视。目前，国际III型环境标志计划正在快速发展，而我国III型环境标志的研究工作刚刚起步，尚未建立III型环境标志认证体系，面临的困难与问题主要表现为：缺乏相应的生命周期清单数据基础，缺乏 LCA 方法实践与应用的成熟经验等。在对产品进行清单分析时需要庞大的数据支持，数据缺失和缺乏完善的本地化 LCA 数据库被认为是阻碍国内广泛开展 LCA 研究与应用的主要问题。因此，对于像 LCA 这种从全生命周期的角度评价产品或工艺过程相关环境因素的方法成为机械产品的迫切需求。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 生命周期评价方法研究现状

生命周期评价的概念始于 20 世纪 60 年代末，能源和资源问题促使人们寻找能说明能源和资源供应和使用的方法^[9]。1969 年，研究人员最早将生命周期评价方法应用于可口可乐公司，比较不同饮料瓶的环境影响，量化了每个饮料瓶的制造过程中原材料、燃料的使用和环境负荷。然而，在 70 年代 LCA 的发展是非常缓慢的，直到 80 年代以后 LCA 才引起广泛的关注和快速的发展。迄今为止，多种 LCA 方法被提出和发展，根据清单数据处理方法的不同，LCA 主要可以分为三大类：过程生命周期评价（Process LCA, P-LCA）、投入产出生命周期评价（Input-output LCA, IO-LCA）和混合生命周期评价（Hybrid LCA, H-LCA）^[10]。

过程生命周期评价是一种传统的、经典的方法，应用最为广泛，它主要基于产品全生命周期过程中的材料和能源流进行评价分析^[11]。过程生命周期评价方法又可以分为两

种：过程流程图法和矩阵转换法。对于一个特定系统，过程生命周期评价可以提供相对精确的和详细的结果。然而过程生命周期评价需要设定系统边界，由于产品系统的上游过程和服务的复杂性，处于系统边界之外的部分被忽略，因此过程生命周期评价的结果存在截断误差^[12,13]。

为了解决过程生命周期评价的截断误差问题，经济投入产出分析被引入到生命周期评价。投入产出生命周期评价是一种利用投入产出表和部门环境数据来宏观分析产品环境表现的方法。IO-LCA 提供了一个灵活的 LCA 工具，理论上具有相对完整的系统边界。然而，IO-LCA 具有一些局限性包括粗糙的部门分类、部门环境数据的缺失、一致性和比例性假设等^[14]。

混合生命周期评价是一种将 P-LCA 和 IO-LCA 相结合的方法，兼具两种方法的优点。十九世纪七十年代，混合方法在能源分析中得到首次应用，但是直到九十年代末混合方法才开始逐渐得到发展和应用，现在已经成为一种主要的 LCA 工具。目前混合生命周期评价方法通常分为三种形式：层次混合生命周期评价（Tiered hybrid LCA, TH-LCA）、基于投入产出的混合生命周期评价（Input-output based hybrid LCA, IOH-LCA）和集成混合生命周期评价（Integrated hybrid LCA, IH-LCA）^[15]。混合 LCA 方法确实能够解决过程 LCA 方法的数据缺失问题，但需要指出的是采用不同的混合 LCA 方法，往往会产生不同的评价结果，有时评价结果还会有较大的差距。因此，混合 LCA 方法本身还存在着许多需要解决的问题。

1.2.2 LCA 软件工具研究现状

（1）国外主要 LCA 软件

目前在世界范围内使用比较广泛的生命周期评价软件基本都是欧洲版，比如荷兰的 SimaPro、德国的 GaBi、法国的 TEAM 等^[16]。

SimaPro 软件由荷兰莱顿大学环境科学中心开发。SimaPro 整合了不同的 LCA 数据库，将不同来源的数据库进行分级存储，数据来源清楚。对于环境影响评价可使用不同的特征化、标准化和权重方法。SimaPro 画面依照 LCA 理论框架编排，使用时只要根据 LCA 流程找到对应的项目即可。选单式的指令容易学习，使用者不需要具备太多生命周期评估的知识就能用生命周期的理念来设计产品。SimaPro7 包含的生命周期清单数据库有：Ecoinvent、US LCI、European LCD、US Input-Output、EU and Danish Input-Output、Dutch Input-Output、Industry data v.2. IVAM、Japanese Input-Output 等^[17]。

GaBi 软件由德国斯图加特大学聚合体试验与科学研究所和 PE 公司联合开发。GaBi 集合了多种 LCI 数据库和大量数据，可以满足广泛的研究需求，在世界范围有着广泛应

用。GaBi 软件具有优良的树结构和结果分析功能，可以自动计算复杂流程图并显示各单元名称及流量，可以进行敏感性分析、冲击分析与成本分析，数据质量指数的使用提高了数据的可靠性。GaBi 虽然功能强大，但是操作较复杂，引用 LCI 数据库时需要经过繁琐的连接过程。GaBi5 包含的 LCI 数据库：主数据库 GaBi Databases, Ecoinvent, US LCI, ELCD, BUWAL 等。数据库同样比较丰富，但在种类上与 SimaPro 有所差异^[18]。

TEAM 软件由法国的 Ecobilan 公司开发，具有优良的树结构功能，并且具有敏感性分析、情景分析、误差分析等功能。数据分为 10 个种类，每类包含 216 个产品的原材料生产、能源消耗、运输的单一数据。该软件对节点及其联系没有数量限制^[19]。对于复杂产品的大系统，能够快速得到清单数据^[20]。

(2) 国外主要 LCA 数据库

目前，各个国家都建立了自己的 LCA 数据库。瑞典的 CPM LCA 数据库，德国的 PROBAS 数据库，日本的 JEMAI 数据库，美国的 NREL 数据库、US LCI 数据库，澳大利亚的 LCI 数据库，瑞士的 Ecoinvent 数据库，欧盟生命周期参考数据库 ELCD。还有生命周期评价软件内置的数据库，如 SimaPro、GaBi 等^[21]。下面对其中被广泛应用的数据库做简单介绍。

Ecoinvent 数据库收集了全球最新的 LCI 数据，数据集超过 4000 多个，涵盖了几乎所有行业。该数据库采用便于数据库之间共享的数据格式 EcoSpold，具有优良的数据透明性和一致性^[19]。

欧盟生命周期参考数据库 ELCD 收集了欧盟范围内的原材料消耗、能源消耗、运输、废物处理等过程的生命周期清单数据。

CPM LCA 数据库由瑞典 CPM 公司联合其他企业开发。该数据库设计了针对环境的可持续产品信息模型，可以有效的构建环境数据，生命周期清单数据集 700 余个，这些数据可以通过网站免费获取。

(3) 国外投入产出生命周期评价数据库

随着投入产出生命周期评价方法的广泛应用，IO-LCA 数据库也得到了一定发展。IO-LCA 数据库主要以单一国家经济系统为边界，最近几年已经出版了跨地区的投入产出表（MRIO），加上环境影响数据，促进了以全球经济系统为边界的 IO-LCA 数据库。下面对国外比较流行的 IO-LCA 数据库做简单介绍。

EIO-LCA 是由卡内基梅隆大学绿色设计团队设计和提供的投入产出生命周期评价数据库，该数据库主要包含了美国投入产出表和经济部门的环境统计数据，近期加入了德国和中国的部分投入产出表和经济部门的环境统计数据。

CEDA 由 IERS LLC 制定和发行。是一个基于经过专业分析的美国、中国、英国和一些欧洲国家的投入产出表的具有专业质量的投入产出数据库。首次发行于 2000 年, 到目前一直在升级更新。该数据库已经被用美国环境保护局、国家标准局和总务管理局委托的各个备受关注的项目中。

EXIOPOL 是一个利用外部环境数据和投入产出工具进行政策分析的新环境计算框架, 是欧盟在 2007 到 2011 的一个研究项目, 编制了包含 44 个国家的 2000 年 MRIO, 每个国家包含 129 个部门(产品×行业), 可以评估每个部门的 30 种环境影响和 80 种资源使用^[22]。

EORA MRIO 数据库是由悉尼大学的综合可持续性分析(ISA)单位开发, 包括了 187 个国家中的 15909 部门×15909 部门, 每一个国家包括 25 到 500 个部门。EORA MRIO 的突出特点是它尽最大可能的保持了每个国家的投入产出表原有部门的分类。在缺少全球统一数据支持的情况下, 编写如此多的部门和国家的数据需要使用假设和简化方法^[23]。然而, EORA MRIO 的部门分辨水平和覆盖范围已被证明对许多研究是非常有价值的。

(4) 国内 LCA 数据库及评价软件研究进展

由于我国 LCA 研究起步较晚, LCA 数据库的建立还比较少, 没有完善的商业化 LCA 数据库。近些年, 在国家 863、973 以及科学基金的支持下, 一些高校和研究所已经开始了建立中国自己的 LCA 数据库和评价软件, 取得到的主要研究成果列举如下:

CLCD 数据库由四川大学与亿科环境公司联合开发, 是目前中国唯一的商业化 LCA 数据库, 数据代表了中国本土的生产技术平均水平, 可以为我国的 LCA 研究和应用提供比较准确的数据支持。CLCD 包含了 600 多个汇总过程数据集, 已被国内多个研究机构、企业以及个人用户应用。CLCD 的评价软件 eBalance 是由亿科自主开发的 LCA 分析软件, 适用于各种产品的 LCA 分析, 支持完整的 LCA 分析步骤^[24]。

北京工业大学等单位在国家 863 计划的支持下调研和收集了中国主要生产材料(例如钢铁、水泥、铝、工程塑料、建筑涂料、陶瓷等)的环境影响数据, 并设计和开发了材料环境协调性评价基础数据库和评价软件^[25]。

兰州大学的徐金成等人研究和建立了面向对象的生命周期评价数据库, 该数据库包含两个部分: 一是材料特性部门, 另一个是环境影响部分。环境影响部分主要是材料在采矿、提取、制造、使用和回收过程中产生的环境排放。该数据库还具有分析材料的环境影响与加工技术之间关系的功能^[26]。

武汉科技大学针对机械加工工艺过程中的资源消耗和环境排放进行了研究, 建立了基于 B/S 的机械加工工艺的资源和环境数据库^[27]。

1.2.3 机械产品生命周期评价研究现状

近些年来,国内外关于压缩机产品以及其他机械产品的生命周期评价研究取得了一定的发展,主要的研究成果总结如下:

巴西学者 Zanghelini^[28]使用 LCA 对比了废旧压缩机不同处理方式(再制造、回收利用、填埋)的环境表现。研究范围包括了压缩机的整个生命周期,从摇篮到坟墓。文中重点考虑了四类环境影响:全球气候变暖、生物资源枯竭、能源需求和土地占用。研究结果表明再制造的环境优势明显,其次是回收利用,直接填埋的处理方式环境表现最差。再制造通过降低生产过程中的原材料消耗使所有类型的环境影响都要小于回收处理的方式。在经济方面,再制造设备可以重新卖给客户,废弃材料作为副产品卖给回收行业,通过使用循环材料减少原材料的用量以及减少填埋相关的费用,这些经济收益远远超过再制造的成本。对于消费者来说,再制造使产品寿命延长,从而降低成本。压缩机的 LCA 结果也表明,当使用阶段的能源消耗是产品环境影响的主要来源时,提高能源使用效率就显得非常重要。Biswas 和 Rosano^[29]运用 LCA 对比了再制造压缩机和新品压缩机在温室气体排放方面的表现。分析表明再制造压缩机温室气体排放要比新品压缩机减少约 89%到 93%。该研究还证实,旧部件再利用次数越多和更换新部件数量越少再制造压缩机的总体碳足迹减少越明显。

Junli Shi^[30]运用 LCA 评价了一个由大连三洋电气公司生产的制冷压缩机,研究范围包括原材料生产、原材料运输、压缩机生产、压缩机运输、压缩机使用以及废弃处理几个主要生命周期阶段的能源消耗和环境排放。与只考虑产品生命周期中的某一个阶段的 LCA 研究相比,Junli Shi 的系统边界更完整,而且生命周期评价的步骤更详细,得到了压缩机的在各个生命周期阶段的不同环境影响类型的表现。研究结果表明,初次能源消耗(PED)、生态毒性(ET)和全球变暖潜力(GWP)是三种主要的环境影响。压缩机使用阶段消耗了大量的电能,而电能的生产会排放大量的污染物,因而其环境影响要远远大于其他阶段。原材料运输和产品运输阶段的环境影响主要来源于汽油燃烧,并且影响大小和运输距离成正相关。在原材料生产阶段,铜的生产排放了大量的重金属和氟氯化碳(CFCs),从而加重了生态毒性和臭氧层破坏。

相比于压缩机产品的 LCA 研究,其他类机械产品的 LCA 研究要多一些。因为机械产品在材料使用和生产工艺方面都具有很大的相似性,所以这些产品的 LCA 研究成果在本研究中也具有一定的参考价值。

美国蒙大拿大学的 Kelly Benton^[31]采用生命周期评价方法量化了一套 455kW 的柴油发电机组在每个生命周期阶段的能源需求:材料生产、制造、运输、使用以及报废处理。

生命周期清单数据主要来自生产企业和它的供应商，能源消耗的计算基于 Ecoinvent 数据库和 ICE 数据库。研究表明，柴油发电机能源消耗情况与公路发动机类似，使用阶段消耗了大部分能源（占整个生命周期的 95% 以上），其次分别是材料生产、运输和制造阶段。因此提高燃油效率具有最大的能源和环境效益。尽管印刷电路板的质量小，但是在材料生产阶段占了 35% 的能源消耗。研究还发现增加再制造和回收率可以大大材料生产阶段的能源需求。

上海交通大学的 Bo Wen 等人^[32]对中国制造的一种岸边起重机进行了从摇篮到坟墓的全生命周期研究。岸边起重机是集装箱码头的关键设备，中国是岸边起重机重要的生产国和出口国。研究表明，在起重机使用阶段几乎所有的环境影响类别都相对较高，因此优化起重机电机效率是降低环境影响的最有效的方法。钢的生产阶段是影响环境的重要来源，例如金属材料消耗、生态毒性、水体富营养化和臭氧层破坏，因此材料回收利用可以显著减少环境影响。另外，研究中还进行了敏感性分析和经济分析，提高了评价结果的可靠性。

重庆大学机械传动国家重点实验室的曹华军等人^[33]基于生命周期评价提出了针对机床的碳排放评估模型，用于量化和分析机床生命周期各阶段的碳排放情况。研究范围包括四个主要的生命周期阶段：制造阶段、使用阶段、运输阶段以及废弃处理阶段。对比分析了数控滚齿机和高速干切削滚齿机生命周期的碳排放，分析结果表明两种机床的碳排放主要来源于使用阶段，高速干切削滚齿机的碳排放明显低于数控滚齿机，值得注意的是使用初期数控滚齿机的碳排放量低于高速滚齿机，当产量超过 13 万件以后数控滚齿机的碳排放量开始超过高速滚齿机。

在家电产品方面，上海交通大学的张建普^[34]基于 ISO14040 系列标准对电冰箱产品进行了详细的全生命周期环境影响评价研究。分三个环节对电冰箱的整个生命周期进行了清单分析和影响评价：生产环节、运输与使用环节、废弃处置环节。基于蒙特卡洛模拟法对电冰箱的生命周期清单分析结果进行了不确定性分析。对冰箱生产环节和废旧冰箱处理环节的典型工艺过程的环境表现进行了重点分析，并提出了改进措施。

上述针对压缩机及其他机械产品的生命周期评价研究使用的都是过程分析方法，清单数据的收集主要依赖于产品具体生产过程中物质和能量的消耗，这可以得到比较精确和详细的清单数据，但是在大多数研究中，过程生命周期评价的结果存在截断误差。为了解决截断误差的问题，经济投入产出分析的思想被引入到生命周期评价中，形成了投入产出生命周期评价方法。将投入产出生命周期评价与过程生命周期评价综合使用，形成了混合生命周期评价方法。混合生命周期评价方法已经被广泛应用于各个行业和产品，本文重点总结了一些基于混合清单分析的机械产品生命周期评价研究成果。

美国学者 Cooney 等人^[35]采用基于混合清单分析的生命周期评价比较了传统的汽油动力客车与各种类型的电力和混合动力汽车。研究表明,使用阶段的大多数环境影响种类占据了主导地位,包括常规汽车的柴油生产和燃烧,电动汽车的电力生产和消耗。燃油汽车和电动汽车哪一种环境表现更好与电力结构有明显联系,以目前国家平均电力结构来说,传统的柴油汽车在全球变暖影响方面比电动汽车更有优势,但是部分地区的电力结构决定了电动汽车对全球变暖影响更小。另外,电池的生产对全球变暖、致癌物、臭氧消耗和生态毒性的影响有较大影响。因此,改进电力结构是减少电动汽车环境影响的主要措施,电池技术的改进也可以有效减少环境影响。

大连理工大学的 Qiuhong Jiang 等人^[11]采用基于投入产出的混合生命周期评价方法分析了中国制造的一台载重柴油发动机的能源消耗和环境排放。研究的系统边界比较完整包括使用前的上游生产阶段、使用阶段以及废弃处理阶段。投入产出子系统的数据主要来源于中国投入产出表和环境统计年鉴。文中比较了混合方法与过程方法评价结果的差异,分析了差距的原因。敏感性分析显示发动机的燃油效率对评价结果的影响较大。最后,采用蒙特卡罗模拟分析了数据来源的不确定性对 LCA 结果的影响。

综上所述,现阶段关于压缩机产品的生命周期评价研究主要是冰箱或空调中的小型制冷压缩机,而且均是基于过程生命周期评价方法,评价结果存在截断误差。目前没有针对大型离心压缩机产品详细的环境影响评价研究,其他大型机械产品的研究结果并不能完全适用于大型离心压缩机产品。

1.3 本课题研究意义和目的

随着我国经济的快速发展,资源和环境问题日益显著。传统的制造业存在高能耗、高自然资源消耗和多种环境污染物排放等问题。在这种情况下,国家提出建立资源节约型和环境友好型社会,走可持续发展道路。而实施生态设计、绿色制造、清洁生产、节能减排以及环境标志认证等技术的关键是从全生命周期角度对产品或工艺过程的环境影响进行综合分析、评价,并给出合理的改进措施。

大型离心压缩机生产过程中不仅会消耗大量资源和能源,而且会排放大量污染物,服役过程中又会产生巨大的电量消耗,这些给压缩机生产企业和用户带来了很大的环境压力。压缩机转子是组成压缩机最重要的部件,本文选取国产大型长输管线离心压缩机 PCL803 的转子部件为研究对象,通过对压缩机转子生命周期环境影响研究,分析压缩机转子在其整个生命周期的资源、能源使用和环境排放情况,识别压缩机转子生命周期中的重大环境问题和薄弱环节,寻找相应的改善方法和措施。

在对产品进行生命周期分析和评价时，需要庞大的数据支持，缺乏完善的本地化 LCA 数据库是国内广泛开展 LCA 研究与应用的主要障碍。随着 GaBi、SimaPro 等国外 LCA 软件在中国的销售，欧盟及发达国家的基础数据库进入中国，但是数据来源不是中国本地数据，所以不适用于中国产品生命周期评价。因此，建立符合中国国情的、可靠的 LCA 数据库及其评价软件是当前迫切需要解决的问题。本文的目的是设计 LCA 基础数据库及评价软件，为后续系统的数据完善提供基础；导入部分中国产品数据清单和环境影响权重，为相关产品的生命周期评价提供必要的技术支持。

1.4 课题来源

本课题来源于国家重点基础研究发展计划（973 计划）项目“机械装备再制造的基础科学问题”（2011CB013400）的子课题“再制造过程的决策支持与综合评价理论”（2011CB013406）。

1.5 研究内容

本文选取国产大型长输管线离心压缩机 PCL803 的转子部件为研究对象，进行了生命周期评价方法的研究及应用，并进行了生命周期评价数据库及软件的设计和开发，具体内容如下：

第一章阐述了研究背景，回顾了生命周期评价方法、软件工具、压缩机产品以及其他机械产品生命周期评价国内外研究现状，简述了研究意义和目的，最后简要介绍了研究的主要内容。

第二章介绍和分析了生命周期评价的主要方法，并针对混合生命周期评价方法中的数据重复计算问题进行了改进。

第三章基于过程清单分析方法建立了压缩机转子生命周期评价的基本模型，利用该模型分别对压缩机转子的各个生命周期阶段进行了详细的清单分析以及环境影响评价，并针对环境影响结果较大的转子生产阶段和叶轮加工过程进行了重点分析和讨论。

第四章运用三种混合分析模型（层次混合分析、基于投入产出的混合分析和集成混合分析）进行了系统边界的扩展，分别基于投入产出分析和三种混合分析模型进行了压缩机转子的生命周期清单分析和环境影响评价，对比分析了不同模型环境影响结果的差别和原因，最后提出了通用的生命周期评价方法的选取准则。

第五章基于不确定性分析和敏感性分析对数据质量进行了评估，根据清单分析结果和环境影响评价结果，分别针对压缩机转子的生产阶段、运输和使用阶段以及废弃处理阶段进行了环境改善分析。

第六章设计和开发了生命周期评价原型软件系统。以 MySQL 作为数据库平台，设计了 LCA 基础数据库，实现了部分中国产品数据清单和环境影响权重的导入，在 openLCA 软件框架的基础上，采用 Eclipse 作为开发工具，进行了 LCA 软件的开发。

最后对本文进行了总结，分析了研究的不足，并对以后的研究进行了展望。

2 生命周期评价方法分析与改进

2.1 基于过程的生命周期评价(P-LCA)

基于过程的生命周期评价方法是一种自底向上的微观方法。该方法理论上要求研究产品全生命周期的所有过程,从最初的自然资源开采直至产品最终报废与环境有关的所有过程。虽然 P-LCA 方法能够完成特定范围的分析,但是因为需要大量的具体数据,一般需要花费大量的时间和成本,因此在大多数情况下只能研究部分过程^[36]。例如机床厂完成一台机床的生产需要大量的零部件,这些零部件的生产制造又需要多种工业材料如钢铁、铝、铜、合金、橡胶和塑料等,而这些工业材料的生产又需要通过各种自然资源如矿石、石油等加工而成,同时这些原材料从获取地点到冶炼厂之间又需要汽车等工具进行运输。因此产品的整个生命周期过程是非常复杂的,生产过程的上游方向可以无限扩展^[37],如图 2.1 所示。

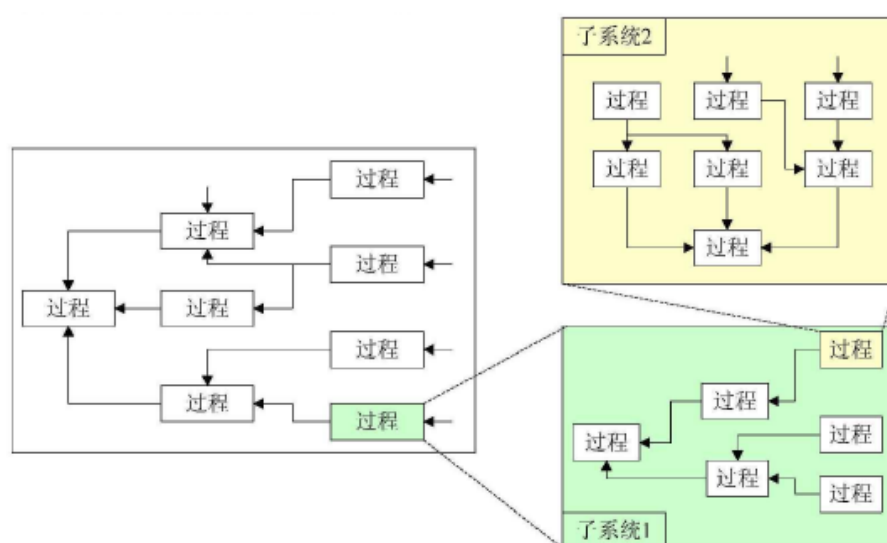


图 2.1 基于过程的生命周期评价模型

Fig.2.1 The model of P-LCA

如果完全按照过程生命周期评价的数据统计方法,清单分析阶段的数据统计工作就会变得非常繁重,在实际的生命周期评价中,不可能做到如此细致的分析,通常只统计对研究结果有重要影响的部分阶段和工艺过程,对影响较小的部分忽略不计。因此,基于过程的清单分析无法研究全部过程,需要设定研究系统的边界,只研究主要的过程,对

于环境影响较小的过程忽略不计，这就导致了过程分析方法存在截断误差^[38]，如图 2.2 所示，这是基于过程的生命周期评价方法无法避免的。

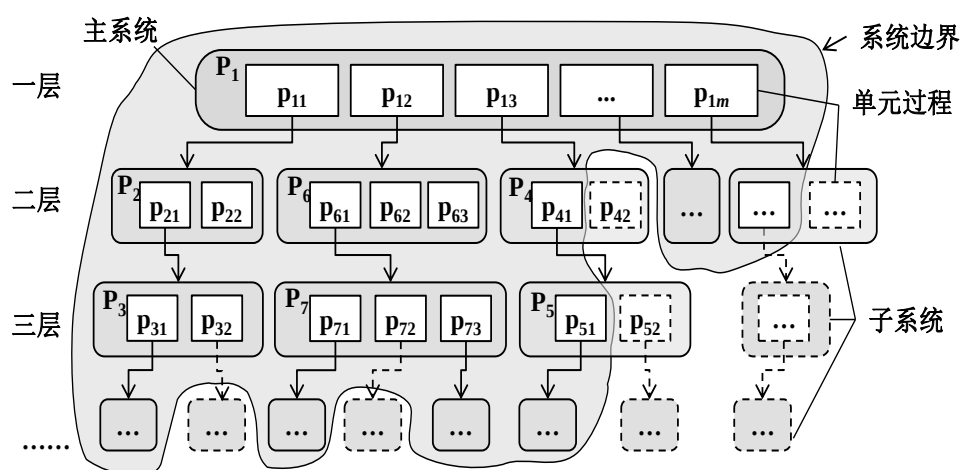


图 2.2 P-LCA 的截断误差

图 2.2 The truncation error of P-LCA

截断误差是因为在实际的产品生命周期评价过程中忽略了产品系统生产过程上游高层次的过程。由于过程生命周期评价的研究范围不能涵盖产品系统上游所有的工艺过程和材料，导致该方法有着高达 20%到 50%的截断误差^[37]。而且，因为缺乏准确可操作的截断标准，在大多数情况下，过程生命周期评价的结果具有较大差异^[39]。

2.2 基于经济投入产出的生命周期评价(IO-LCA)

2.2.1 投入产出分析

投入产出分析（Input-Output Analysis, IOA）最早由美国经济学家 Wassily Leontief 提出^[40]，用来描述整个经济系统中行业之间的价值流动，重要组成部分是投入产出表，他还因此获得了 1973 年的诺贝尔经济学奖。投入产出理论认为一个国家的经济系统是由具有直接或间接联系的不同部门组成的。这些部门之间的相互联系是通过原材料、零部件、产品、生产的厂家、供应商、零售商等组成的一个供应链网络。这些组成之间的关系可以通过矩阵的形式来表示国民经济各部门在一定时期（通常为 1 年）内生产的投入来源和产出的使用去向，揭示国民经济各部门间相互依存、相互制约的数量关系。通过建立棋盘式的投入产出表和建立相应的线性代数方程体系，可以构成一个模拟现实的国民经济结构和社会产品再生产过程的经济数学模型来综合分析和确定国民经济各部门

间错综复杂的联系和再生产的重要比例关系。

2.2.2 投入产出表基本结构

投入产出表展示了国家经济贸易的总体情况，它能够显示出产品如何从生产到销售再到终端客户或者销售到其他行业部门接受深层次的加工。投入产出表中的部门数量和部门分类，各个国家而有所差异^[41]。

表 2.1 产品部门×产品部门表的基本结构
Tab.2.1 The basic structure of product sector × product sector

产品的分配去向 (产出) 产品的 消耗去向 (投入)		中间产品				最终产品			总 产 品
		部 门 1	⋮	部 门 n	合 计	投 资	消 费	合 计	
物质 消耗 (中间投入)	部门 1	I				II			
	部门 2								
									
	部门 n								
	合计								
净 产 值	劳动报酬	III				IV			
	社会纯收入 合计								
总产值									

投入产出表包括供给表、使用表和产品部门×产品部门表（表 2.1），这里只介绍产品部门×产品部门表。产品部门×产品部门表^[23]由四部分组成，第一部分（I）由名称相同、排列次序相同、数目一致的 n 个产品部门纵横交叉而成，其中主栏表示中间投入，宾栏表示中间使用，它充分揭示了国民经济各产品部门之间相互依存、相互制约的技术经济联系，反映了国民经济各部门之间相互依赖、相互提供劳动对象供生产和消耗的过程。表的行表示第 i 产品部门生产的货物或服务提供给第 j 产品部门使用的价值量，表的列表示第 j 产品部门在生产过程中消耗第 i 产品部门生产的货物或服务的价值量。第二部分（II）是第一部分在水平方向上的延伸，其主栏与第一部分的主栏相同，也是 n 个产品部门，其宾栏由最终消费、资本形成总额、出口等最终使用项组成，它表示各产品部门生产的货物或服务用于各种最终使用的价值量及其构成。第三部分（III）是第一部分在垂直方向上的延伸，其主栏由劳动者报酬、生产税净额、固定资产折旧和营业盈余等增加值项组成，其宾栏与第一部分的宾栏相同，也是 n 个产品部门，它表示各产品

部门增加值的构成情况。第四部分(IV)是国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)。GDP 是指在一定时期内(一个季度或一年),一个国家或地区的经济中所生产出的全部最终产品和劳务的价值,被公认为衡量国家经济状况的最佳指标。GDP 不但能够反映一个国家的经济情况,而且可以反映一个国家的国力与财富。通常,国内生产总值由四个不同的部分组成:居民消费、投资、政府支出和净出口额。

产品部门 $\times$ 产品部门表的平衡关系是:

从纵列方向看,第 j 产品部门中间投入合计+第 j 产品部门增加值合计=第 j 产品部门总投入;

从横行方向看,第 i 产品部门中间使用合计+第 i 产品部门最终使用合计-第 i 产品部门进口=第 i 产品部门总产出;

从总量看,总投入=总产出;

第 i 产品部门总投入=第 i 产品部门总产出;

行模型为:中间使用+最终使用-进口=总产出;

列模型为:中间投入+增加值=总投入。

在投入产出分析中,最重要的是使用投入产出表中的中间使用系数构成的 $n \times n$ 矩阵来计算直接消耗系数。直接消耗系数(Direct input coefficients)的计算方法为:用该产品部门生产中所直接消耗的第 i 产品部门的商品或服务价值量 x_{ij} 除以第 j 产品部门的总投入 X_j ,

$$a_{ij} = x_{ij} / X_j \quad (2.1)$$

其中, $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

直接消耗系数一般用字母 A 表示,其中 a_{ij} 等于 j 部门一个单位产出所需要的 i 部门的投入量,它表示在生产活动中第 j 产品部门的单位总产出所直接消耗的第 i 产品部门货物或服务的价值量。将各个产品部门的直接消耗系数用表或矩阵的形式表示出来,就是直接消耗系数表或直接消耗系数矩阵。

投入产出分析的基本形式用矩阵表示为:

$$AX + F = X \text{ 或 } X = (I - A)^{-1}F \quad (2.2)$$

其中,矩阵 A 是投入产出系数矩阵,元素 a_{ij} 表示行业 j 单位产出对产品 i 的消耗量。矩阵 X 表示行业总产出,元素 x_{ij} 表示行业 j 的总产出。 F 是最终需求向量,它的第 i 个元素表示商品 i 的最终需求。

总产出 X 也可以表示成最终需求和所有中间需求之和,即将 X 写成无穷级数的形式:

$$X = (I - A)^{-1}F = F + AF + AAF + AA AF + \dots \quad (2.3)$$

其中, F 表示最终需求。 AF 表示直接需求, $(AAF+AAAF+\dots)$ 表示所有中间需求, $(I-A)^{-1}$ 表示完全需求。

2.2.3 IO-LCA

针对基于过程生命周期评价具有边界截断的缺点, 将投入产出分析应用到 LCA 开始得到关注。Moriguchi 等人^[42]使用投入产出分析进行了汽车的生命周期评价, 系统边界的上游完整性得到提高。后来通过使用更加全面的环境数据投入产出生命周期评价得到了进一步丰富。

假设行业部门的环境影响和行业部门的产出成正比, 定义一个环境影响矩阵 R , 表示每个行业单位产出所消耗的自然资源和环境排放, 基于经济投入产出分析的生命周期清单计算模型可以写成^[43]:

$$E_{IO} = RX = R(I - A)^{-1}F \quad (2.4)$$

其中, E_{IO} 表示某一行业部门一定量的产出所产生的全部自然资源消耗和污染排放, R 表示环境影响系数矩阵, X 表示总产出, F 表示最终需求向量, 是一个 n 元列向量, n 表示国民经济部门的数量, 其中被研究产品的价格即为对应部门的元素值, 其他元素均为 0。

环境影响系数矩阵 R 中元素 r_{kj} 可以表示为:

$$r_{k,j} = \frac{C_i}{X_i} \quad (2.5)$$

式中, r_{kj} 表示部门 i 每单位价值产出排放的污染物 k 的质量, X_i 表示部门 i 的总产出 (万元), C_i 表示部门 i 排放的污染物 k 的总质量。

经济投入产出分析法最大的优势在于它能快速覆盖整个经济系统, 将所有的物质和能量输入计算在内, 从而简化了清单创建过程。投入产出法可以用较少的资源和时间提供比较完整的环境影响评价系统边界。投入产出法最大的问题是行业部门分类太粗糙, 导致数据聚集度太高。通常投入产出表中最多分为几百个行业部门, 这就导致多种产品可能包含在一个大类产品中, 从来削弱了产品的差异性。例如, 2012 年中国投入产出表分为 139 个行业。然而在实际应用时, 投入产出分析方法最大的障碍是行业部门环境数据的缺乏, 虽然有一些零碎的排放清单数据库可用, 但是详细程度的差异、基准年和行业分类使得难以构建均衡的行业环境数据。投入产出分析法还存在其他几个无法避免的问题。第一, 投入产出分析方法只能为产品生命周期的使用前阶段提供清单分析, 而产品生命周期的其余阶段在系统边界之外。第二, 投入产出表只统计了国内的经济数据,

进口数据没有计算在内。第三，投入产出数据的即时性一般比基于过程的数据差，因为基于行业调研的投入产出表每 5 年才出版一次。因此，对于严重依赖于进口或应用了新技术的产品，投入产出分析方法的适用性是有限的。

2.3 混合生命周期评价(H-LCA)

由于 P-LCA 方法和 IO-LCA 方法的优缺点可以互相补充，因此将 P-LCA 方法和 IO-LCA 方法相结合，扬长避短，形成了混合分析方法。混合分析方法通常可以分成三种不同的类型，分别是层次混合分析、基于投入产出的混合分析、集成的混合分析。

2.3.1 层次混合分析模型

层次混合分析(Tiered hybrid LCA, TH-LCA)是一种最简单的混合清单分析方法。Bullard 等人^[44]在 1978 年结合过程分析与投入产出分析计算了美国的净能源消耗。Moriguchi 等人^[42]在 1993 年首次将层次混合分析引入到生命周期评价。在层次混合分析中，利用基于过程的方法详细分析使用、废弃处置以及几个重要的上游过程，剩下的过程使用基于投入产出的方法进行分析。然后将基于投入产出分析方法的清单结果与基于过程分析的清单结果直接相加。层次混合分析模型可以写成：

$$E_{TH} = E_{IO} + E_P = R(I - A)^{-1}F + E_P \quad (2.6)$$

其中， E_{TH} 表示过程分析方法和投入产出分析方法的总的环境影响结果， E_{IO} 表示通过投入产出法得到的使用前生命周期阶段的环境影响， E_P 表示通过过程方法得到的使用、废弃处置以及一些重要的上游生产过程的环境影响。

TH-LCA 提供了相对完整的系统边界，数据的获取也相对简单，集合了 P-LCA 和 IO-LCA 的许多优点，但也存在一些问题。首先，TH-LCA 虽然可以提供相对完整的系统边界，但是对于过程系统和投入产出系统边界的选择应该慎重。其次，TH-LCA 方法中存在重复计算的问题，投入产出表中的数据如果已经包含在了过程系统中，这部分数据应该从投入产出系统中减去。再次，由于 TH-LCA 分开处理过程系统和投入产出系统，因此它们之间的相互影响不能计算在内^[9]。

其中，过程系统和投入产出系统的接合边界的位置取决于过程分析的研究范围，考虑到过程分析的具体性和准确性等优点，过程分析的范围应该尽量拓展。然而，随着过程分析的深入，会出现边界重叠问题，已经包含在过程分析中的数据应该从投入产出系统中减去。在这里使用系统不完整性因子来解决重复计算的问题。

投入产出分析模型可以分解为：

$$E_{IO} = R(I - A)^{-1}F = RF + RAF + RA^2F + RA^3F + \dots \quad (2.7)$$

其中，第一项表示产品生产系统的第一级子系统的环境影响，以此类推。

具有 k 层子系统的产品行业部门 j 的环境影响指标 n 的系统不完整性因子可以定义为：

$$SIF_{j,n,k} = \frac{E_{j,n,\infty} - E_{j,n,k}}{E_{j,n,\infty}} = 1 - \frac{E_{j,n,k}}{E_{j,n,\infty}} \quad (2.8)$$

其中， $E_{j,n,k}$ 是产品前 k 层子系统的部门 j 的影响指标 n 的环境影响结果。

根据系统不完整性因子 SIF ，改进后的层次混合分析模型可以写为：

$${}_{TH}E = \sum_{k=0}^K {}_P E_k + (RA^{K+1}F + RA^{K+2}F + \dots) = {}_P E + SIF \times {}_{IO}E \quad (2.9)$$

其中， ${}_P E$ 表示 P-LCA 计算的产品过程前 k 层的环境影响， ${}_{IO}E$ 表示 IO-LCA 计算的产品后 k 层的环境影响。

产品过程层的深度 k 可以根据结构树流程图进行估计，如图 2.3 所示。图 2.4 表示了层次混合分析模型的系统完整性曲线。

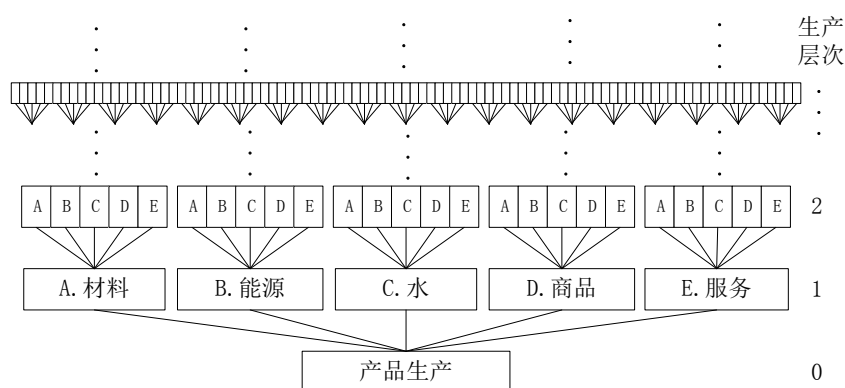


图 2.3 经济系统中行业之间的相互联系

Fig.2.3 Industrial interdependence in the economy system

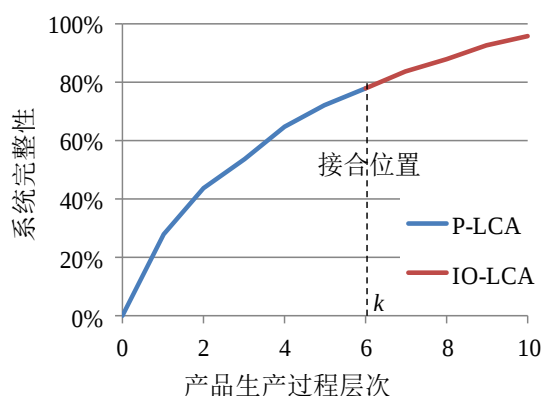


图 2.4 层次混合分析的系统完整性曲线

Fig.2.4 System completeness curve in TH-LCA

2.3.2 基于投入产出的混合分析模型

Treloar 在 1997 年首次使用基于投入产出的混合分析方法评价了澳大利亚的能源需求状况^[45]。基于投入产出的混合分析方法通常是将生产过程的物质流转变成经济流，然后把所研究的产品从投入产出表的行业部门中分解出来。Joshi^[28]对该模型给予了较为完整和详细的论述，他将该模型细分为 6 类。第一类是被研究产品可以归类到投入产出表中的某个部门；第二类是在投入产出表中没有与被研究产品相对应的部门，此时应该根据产品的实际生产情况，将其作为一个新的产业部门添加到投入产出表中进行计算；第三类是指现有产业部门分类过于粗糙，需要对所研究的部门进行拆分，将所研究产品单独分解出来；第四类是根据被研究产品比较详细的过程数据对多个产业部门进行拆分和添加的情况；第五和第六类是在计算模型中分别嵌入被研究产品在使用和废弃处理阶段的数据。本文只研究第二类模型，将所研究的产品部门从投入产出表中的部门单独分解出来。例如，将笔记本电脑从电脑产品中分离出来。由于投入产出表只能覆盖产品使用前的生命周期阶段，使用和报废处理阶段仍使用基于过程的方法计算。运用该方法分析环境影响的步骤为：

- (1) 建立一个投入产出模型；
- (2) 选择一个与被研究产品最相近的部门；
- (3) 建立与被研究产品相关的具体排放和投入产出数据；
- (4) 用具体的 LCA 数据代入原有的部门；
- (5) 估测每个部门每万元的环境排放系数矩阵；

基于投入产出的混合方法的计算模型可以写成：

$$E_{IOH} = E'_{IO} + E'_p = R'(I - A')^{-1}F' + E'_p \quad (2.10)$$

式中， E'_{IO} 是产品使用前阶段的环境影响， E'_p 是产品使用和废弃处置阶段的环境影响，符号（'）表示分解后的矩阵或向量。投入产出表的分解是基于投入产出的混合分析方法中最重要的部分，也是最复杂的部分。假设投入产出表中行业 j 和它的主要产品 i 被分解（比如 j_a, j_b, i_a 和 i_b ），扩展后的技术系数矩阵可以表示为：

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j_a} & a_{1j_b} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i_a1} & \cdots & a_{i_a j_a} & a_{i_a j_b} & \cdots & a_{i_a n} \\ a_{i_b1} & \cdots & a_{i_b j_a} & a_{i_b j_b} & \cdots & a_{i_b n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj_a} & a_{nj_b} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

从矩阵 A' 中可以看出, 一共 $4n$ 个系数需要重新计算, 这些系数之间的关系用公式 (2.12) 到公式 (2.15) 来表示。

$$a_{.j} = (1-s) \times a_{.j_a} + s \times a_{.j_b} \quad (2.12)$$

$$a_{i_b.} = s \times a_{i.} \quad (2.13)$$

$$a_{i.} = a_{i_a.} + a_{i_b.} \quad (2.14)$$

$$a_{ij} = (1-s) \times (a_{i_a j_a} + a_{i_b j_a}) + s \times (a_{i_a j_b} + a_{i_b j_b}) \quad (2.15)$$

式中, 系数 s 表示分解出的产品与原产品的价格比值。

总的来说, 通过公式 (2.12)、(2.14)、(2.15), 可以解出 $2n-1$ 个系数的值, 剩下的 $2n+1$ 个系数由下述方法确定: 列 a_{ja} 和 a_{jb} 用生产过程的上游需求信息来确定, 行 a_{ia} 和 a_{ib} 用产品的销售结构数据来确定。

同样的, 环境影响系数矩阵 R 也需要进行相应的分解, 矩阵 R 中的列向量 r_j 分解成两个列向量 r_{ja} 和 r_{jb} , 两者之间的关系为:

$$r_{.j} = (1-s) \times r_{.j_a} + s \times r_{.j_b} \quad (2.16)$$

式中, 系数 s 表示分解出的产品与原产品的价格比值。

2.3.3 集成混合分析模型

Suh 和 Huppes 将过程分析模型和投入产出分析模型集成到统一的计算框架下, 可以将两者之间的相互影响计算在内, 称为集成混合清单分析 (Integrated hybrid LCA, IH-LCA) 方法。集成化混合生命周期评价模型的优点之一是通过建立统一的数学计算框架, 避免了过程模型与投入-产出模型结合时的重复计算, 同时保证了研究系统边界的全面性和完整性。该模型的不足是对数据的需求较大, 研究时间较长, 且该模型的应用和操作相对复杂。

Suh 和 Huppes 将 LCA 中的矩阵符号计算结构同产品 LCA 数学框架的输入输出分析相结合, 从 P-LCA 和 IO-LCA 两方面提出了集成的混合方法。集成的混合 LCA 分析模型通过边界流将过程 LCA 和输入输出两个系统连接在一起, 用每个过程的单位操作时间的物理单位表示技术矩阵 A^* (例如 kg/h), 而输入输出系统则用货币单位来表示。集成混合模型的一般公式为^[10]:

$$E_{IH} = R_{IH} A_{IH}^{-1} F_{IH} = \begin{bmatrix} R^* & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^* & -C^d \\ -C^u & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

式中, 矩阵 R^* , A^* 和 F^* 分别表示过程系统的环境影响系数矩阵、技术系数矩阵和最终需求向量, R 和 A 分别表示投入产出系统的环境影响系数矩阵和技术系数矩阵,

矩阵 C^u 和 C^d 分别表示过程系统的上游截断流和下游截断流。

技术矩阵 A^* 里的数据为每个过程的单位操作时间的物理单位（例如 kg/h），直接消耗系数矩阵 A 中的数据为某部门每单位产出价值需要的另外部门的投入价值量（如万元/万元）， C^u 中的数据为每个过程单位操作时间的价值单位（如万元/h）， C^d 为每个部门单位价值产出的物理单位（如 kg/万元）。

因为研究对象的所有生命周期阶段都通过技术系数矩阵 A_{IH} 来表达，所以微观的具体过程与宏观的经济部门之间的联系被统一到一个计算框架之下，过程系统和投入产出系统之间的相互影响被计算在内。需要注意的是，集成混合分析方法也存在数据重复计算的问题，如果 A^* 中的过程数据已经包含在了投入产出系统 A ，应该将重复的部分从投入产出系统 A 中减去，改进后的公式为：

$$E_{IH} = R_{IH} A_{IH}^{-1} F_{IH} = \begin{bmatrix} R^* & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^* & -C^d \\ -C^u & I - A^{corr} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} F^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

其中， A^{corr} 是改进后的技术系数矩阵，其他矩阵与上面的一样。

因为集成混合模型中使用的投入产出框架是基于商品分类的技术系数矩阵，所以减掉重复的部分也应该通过矩阵进行。首先定义 Z^* 为功能过程流矩阵。如果一些用于稳态近似的基础周期是 1 年以上，对角矩阵必须乘以相关值将他们全部调整到 1 年以上。假设 Z^* 、 Z^{u*} 和 Z^{d*} 已经基于一年的基础周期进行了调整。提取功能过程流矩阵 Z^* 的部分构成了 Z^l 。进一步将 Z^l 分成两个矩阵 V^l 和 U^l ，满足公式：

$$(V^l)^T - U^l = Z^l \quad (2.19)$$

V^l 是一个过程功能流矩阵， U^l 是一个流过程矩阵。进一步定义一个商品功能流矩阵 P_F ，如果功能流 j 属于商品 i ，则 $P_F | (P_F)_{ij}=1$ ，否则等于 0。相似的定义一个投入产出行业中的过程矩阵 P_P ，如果过程 i 属于行业 j ，则 $P_P | (P_P)_{ij}=1$ ，否则等于 0。矩阵 P_F 和矩阵 P_P 分别是一个功能流置换矩阵和过程流置换矩阵。

U^{**} 定义为商品行业矩阵，通过价格表示的国内和进口的当前商品和资本的国内行业总使用。 V^{**} 定义为行业商品矩阵，通过价格表示的国内产业的商品总生产。基于过程的系统所消耗的商品部分从使用矩阵中减去为：

$$U^{***} = U^{**} - (m P_F U^l P_P + m P_F Z^{d*} + Z^{u*} P_P) \quad (2.20)$$

其中， m 表示价格因子。

基于过程系统的商品部分也从矩阵 V^{**} 减掉：

$$V^{***} = V^{**} - m (P_P)^T V (P_F)^T \quad (2.21)$$

商品技术系数矩阵通过减少制造和使用以上两个公式中的矩阵,利用相关模型,如产业技术模式或商品技术模型,表明了商品流的关系,排除了那些已经包含于基于过程的系统。 A^{corr} 表示了不包括重复数据的商品投入产出技术矩阵,相似的 R 也需要将过程系统中的环境干预数据从投入产出系统中减掉。

2.4 LCA 方法比较

表 2.2 比较和总结了五种 LCA 方法的几个主要方面包括:数据来源、数据的不确定性、上游系统的边界、技术系统的边界、时间和劳动强度、应用的难易程度。

表 2.2 生命周期分析方法的比较
Tab.2.2 Comparison among the LCA methods

类别	P-LCA	IO-LCA	TH-LCA	IOH-LCA	IH-LCA
数据来源	过程数据	投入产出数据	过程数据和投入产出数据	过程数据和投入产出数据	过程数据和投入产出数据
数据不确定性	低	较高	取决于过程数据和投入产出数据的比例	较低	低
上游系统边界	不完整	完整	完整	完整	最完整
技术系统边界	完整	不完整	取决于过程数据和投入产出数据的比例	完整	完整
时间和劳动强度	高	低	高	较高	最高
应用的难易性	简单	简单	简单	复杂	最复杂

过程分析方法要求具体的过程信息,数据要求和时间人力成本都较高,而投入产出方法通常表现出更低的数据要求。系统边界方面,使用投入产出分析在上游系统边界表现出了更高的完整性,而使用过程分析则在技术系统边界表现出了更高的完整性。应用的难易性方面,基于投入产出的混合方法和集成的混合方法比其他方法更复杂。

再研究三种混合方法中链接过程子和投入产出系统的机制。层次混合法、基于投入产出的混合法、集成混合法的计算结构分别用公式(2.22)、(2.23)、(2.24)的矩阵形式表达:

$$E_{TH} = R A^{-1} F + R(I - A)^{-1} F \quad (2.22)$$

$$E_{IOH} = \tilde{R} \tilde{A}^{-1} \tilde{F} + R'(I - A')^{-1} F' \quad (2.23)$$

$$E_{IH} = \begin{bmatrix} \tilde{R} & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & -C^d \\ -C^u & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{F} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

为了方便比较,重新编排公式(2.22)和公式(2.23),如下列公式(2.25)和(2.26):

$$E_{TH} = \begin{bmatrix} \tilde{R} & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & 0 \\ 0 & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{F} \\ F \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$E_{IOH} = \begin{bmatrix} \tilde{R} & 0 \\ 0 & R' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & 0 \\ 0 & I - A' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{F} \\ F' \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$E_{IH} = \begin{bmatrix} \tilde{R} & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & -C^d \\ -C^u & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{F} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$\tilde{R}$, $\tilde{A}$, $\tilde{F}$ 分别代表过程子系统的环境影响矩阵、过程技术矩阵和最终需求向量;而 R , A , F 分别代表投入产出子系统的环境影响矩阵、直接消耗系数矩阵和最终需求向量。

不难发现,将公式(2.24)中的 C^u 和 C^d 代入 0,公式(2.25)表示的层次 LCA 以及公式(2.26)表示的拆分 LCA 其实是公式(2.27)集成 LCA 的特例。层次和拆分混合分析中没有 C^u 和 C^d ,而是用 0 矩阵代替。这说明在这两种混合分析中,过程子系统和投入产出子系统之间并没有正式结合,而是通过外部的最终需求向量确定,这也造成了层次和拆分两种混合分析方法中存在投入产出最终需求 F ,而集成 LCA 中只需要过程子系统的最终需求 $\tilde{F}$ 。

最后对三种混合方法进行比较,它们之间的不同可以用图 2.5 来表示。图 2.5 中,外框实线表示整体系统边界,暗色部分代表投入产出系统,白色部分则代表过程系统,内框虚线表示过程系统部分和投入产出系统部分之间的边界,图(b)中的麻点部分代表分解的投入产出系统。层次混合分析方法中,进入过程系统的商品用投入产出系统模拟。图(a)中,只有单向箭头,即从投入产出系统到过程系统。在图(b)基于投入产出混合分析法中,包含两种过程类型,即使用和处置阶段,这两阶段用过程系统描述,而其他商品流则用拆分的投入产出系统描述。在图(c)集成混合分析中,商品流的主要部分用过程分析进行描述,而截断部分则用投入产出系统描述,因此箭头是双向的,既可以从投入产出系统到过程系统(上游截断流),又可以从过程系统到投入产出系统

(下游截断流), 形成了一个网状而不是树形结构。

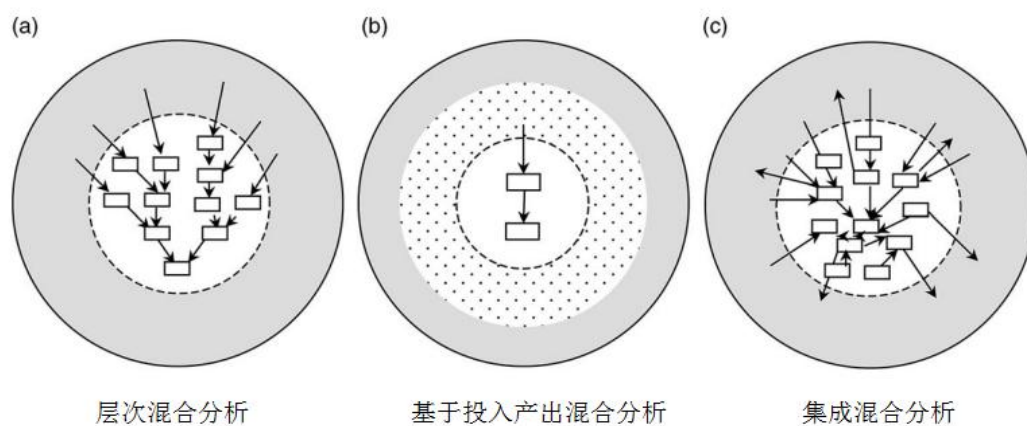


图 2.5 三种混合分析方法的比较示意图

Fig.2.5 Comparison of three methods of mixed analysis

2.5 本章小结

本章分析了生命周期评价的主要方法, 一种是基于过程的生命周期评价方法, 另一种是基于投入产出的生命周期评价方法, 混合生命周期评价方法将过程生命周期评价方法和投入产出生命周期评价方法结合起来, 同时具有了两者的优点, 解决了各自的不足。然后针对混合生命周期评价方法中的数据重复计算问题进行了改进。

3 基于过程清单分析的压缩机转子生命周期评价

3.1 研究目标和范围

3.1.1 研究对象

本研究以大型长输管线离心压缩机 PCL803 的转子部件（图 3.1）为研究对象，该压缩机是由沈阳鼓风机有限公司为我国西气东输工程设计的大型离心式压缩机，平均功率为 18.4MW，基本技术参数如表 3.1 所示。压缩机是为天然气输气管道提供动力的核心装备，而转子是压缩机组的重要组成部分，通常每个压缩机有 1-2 个转子备件。转子也是整个压缩机组中制造过程最为复杂的部件，转子的制造是压缩机组的重中之重。



图 3.1 PCL803 离心压缩机转子

Fig.3.1 PCL803 centrifugal compressor rotor

表 3.1 PCL803 压缩机的基本技术参数

Tab.3.1 Basic technical parameters of PCL803 compressor

类别	数量	单位
额定功率	18404	kW
额定转速	6100	r/min
排气量	239.93	kg/s
额定进气压力	7.1	MPa
许用进气温度	20	℃
排气压力	11.95	MPa
排气温度	63	℃

3.1.2 研究目标

评价大型离心压缩机转子在整个生命周期过程中能源消耗以及环境污染排放情况；识别对能源和环境有重大影响的生命周期阶段，寻求改善的对策，实现压缩机转子产品

的节能减排目标；诊断某零部件生产工艺中的环境问题，用于工艺方案改进，实现清洁生产的目标。

本研究中的功能单元为一套 PCL803 大型离心压缩机转子。

3.1.3 系统边界

根据 ISO14040 标准，系统边界应该包括可能影响整体评价结果的每一个生命周期过程。但是由于产品整个生命周期所涉及的过程是无限的，基于过程的生命周期评价需要设定研究系统的边界。系统边界的设定需要综合考虑多种因素：研究目标、结果的要求精度，时间和人力的限制等。在实际操作中，为了便于清单数据收集，每一过程或阶段可以看作是总产品系统的一个子系统。

本研究确定的压缩机转子的系统边界如图 3.2 所示，包括原材料生产、原材料运输、压缩机转子的制造、压缩机转子的运输、压缩机转子的使用以及废弃处置 6 个主要生命周期阶段。其中压缩机转子的制造和废弃处置阶段是本文的研究重点。

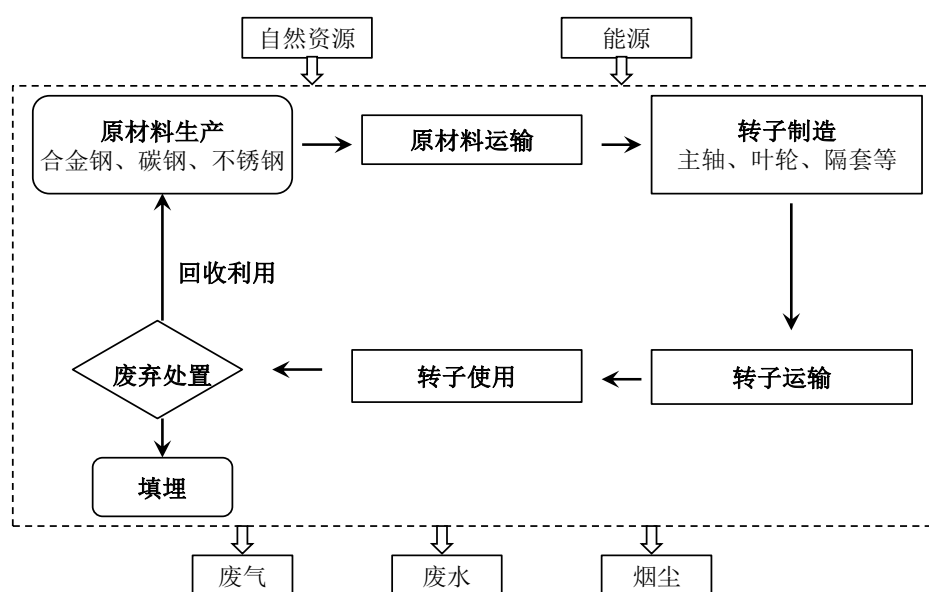


图 3.2 基于过程生命周期评价的压缩机转子系统边界

Fig.3.2 The system boundary of compressor rotor based on P-LCA

上述所有阶段的时间边界均为 2015 年，压缩机转子制造阶段的地理边界限于沈阳市，运输阶段的地理边界为中国东北和西北地区。压缩机转子制造阶段的技术边界为企业的实际生产水平，其他阶段为全国的平均技术水平。

3.1.4 假设条件

在进行压缩机转子生命周期评价过程中，某些数据存在不确定性或缺失，为了研究的顺利进行，需要做出一些假设条件。

(1) 假设压缩机转子各个生命周期阶段消耗的电能组成均为火电 70%，水电 20%，核电 5%，风电 5%。

(2) 假设原材料运输和产品运输阶段车辆消耗的燃油均为汽油。

(3) 在压缩机转子制造阶段有些原材料的消耗量无法准确获取，例如切削液，因此本文中有些原材料消耗来源于相关文献。

(4) 假设压缩机转子使用阶段只有电能投入。由于维修保养很少，且产生的环境影响很小，对这部分做忽略处理。

(5) 回收阶段的部分数据参考相关文献。

3.1.5 数据收集方法

数据收集需要根据研究目标进行，使数据的质量满足研究目标的要求。本研究中采用的数据收集方法主要包括以下几种：

(1) 企业调研。进入生产企业现场收集和记录实际生产数据，包括设备信息，物料清单和加工工艺规程等数据。这些数据最符合实际生产情况，数据质量最高。调研过程也是生命周期清单分析过程中最耗时、耗力的环节。

(2) 生命周期评价数据库。从生命周期评价数据库可以方便的获取相关数据，这些数据的可靠性较高。本研究使用的数据库包括中国本土基础数据库(CLCD)和 GaBi 软件中内置的 Ecoinvent 数据库。

(3) 文献资料。文献资料包括政府出版的统计年鉴和报告，期刊论文，专著和专利等，这些数据具有很好的借鉴价值。

3.2 生命周期清单分析

3.2.1 生产阶段

生产阶段包括原材料的生产和压缩机转子的生产，基本生产流程如图 3.3 所示。从生产流程图中可以看出，零件的生产过程是整个压缩机转子生产阶段的主体。不同零件的生产工艺有些差别，但是基本可以分为粗加工、热处理、检查、半精加工、精加工和检测等阶段。然后，把生产好的零件和一些外购件组装成转子部件。组装过程比较简单，

数据收集也相对容易，而零件的生产过程比较复杂，数据来源也比较多样，生产各零件的材料和电力消耗见表 3.2。

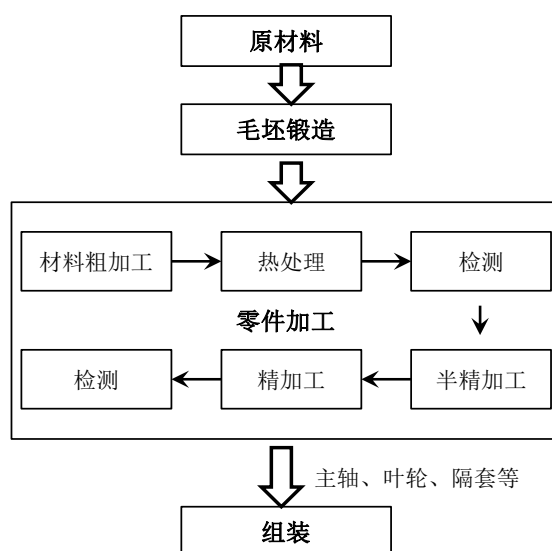


图 3.3 压缩机转子生产流程

Fig.3.3 The production process of compressor rotor

表 3.2 生产阶段的材料和能源消耗量

Tab.3.2 Material and energy consumption during production stage

名称	数量	材料	毛坯 (kg)	净重 (kg)	电能 (kW h)
主轴	1	40NiCrMo7	1717	952.7	8315.0
叶轮	3	KMN-2	2953	379	136313.8
隔套	4	X12Cr13	489	116.6	951.2
平衡盘	1	X12Cr13	327	182.4	829.4
推力盘	1	45	46	25.65	116.6
螺母	2	X12Cr13	59	19	1701.1
螺栓	2	FV520B	0.28	0.142	60.5
推力盘锁紧螺母	1	45	3.7	1.85	7.98
紧定螺钉	2	X12Cr13	0.13	0.062	0.27
调整垫	1	45	0.37	0.19	0.82
调整垫	2	25Cr2Ni3Mo	1.1	0.5	2.16
垫片	1	Q215	0.03	0.022	0.09
垫圈	2	FKM	0.04	0.018	0.08
装配	/	/	/	/	4039.2
总计	/	/	5596.65	1678.1	152338.2

从表 3.2 可以看出，一套 PCL803 压缩机转子由一个主轴、三个叶轮、四个隔套、一个平衡盘、以及其他附件组成。各零件毛坯从外厂购买，然后由企业自己加工，垫片

垫圈为外购产品，不需要加工。生产过程中的能源消耗和材料消耗直接在现场调研。压缩机转子使用的各种材料主要可以分为三种类型：合金钢、不锈钢和碳钢。两个垫圈由橡胶制成，由于质量很小，其环境影响可以忽略不计。压缩机转子毛坯材料需求量分别为合金钢 4670.0kg、不锈钢 876.51kg、碳钢 50.12kg 和橡胶 0.04kg。计算得到原材料生产阶段和压缩机转子生产阶段的清单结果，如表 3.3 和表 3.4 所示。

表 3.3 压缩机转子原材料生产阶段的清单结果 (kg)

Tab.3.3 The inventory results of raw material production (kg)

名称	合金	不锈钢	碳钢	总和
煤	4.34E+03	1.73E+03	7.02E+01	6.14E+03
原油	1.27E+03	1.68E+02	2.23E+00	1.44E+03
天然气	1.04E+03	3.84E+02	6.52E-01	1.42E+03
CO	9.61E+01	1.80E+01	1.57E+00	1.16E+02
CO ₂	1.52E+04	4.97E+03	1.42E+02	2.03E+04
SO ₂	5.52E+01	1.68E+01	3.71E-01	7.24E+01
NO _x	3.37E+01	1.26E+01	2.32E-01	4.65E+01
CH ₄	3.12E+01	1.21E+01	3.27E-01	4.36E+01
H ₂ S	9.91E-02	2.86E-02	6.14E-03	1.34E-01
HCL	1.41E+00	8.48E-01	1.49E-02	2.27E+00
COD	3.85E+01	2.42E+01	3.08E-01	6.30E+01
NH ₃	5.76E-01	1.87E-01	6.56E-03	7.70E-01
烟尘	3.76E+02	8.65E+01	5.78E+00	4.68E+02

表 3.4 压缩机转子制造阶段清单结果 (kg)

Tab.3.4 The inventory results of manufacture stage (kg)

清单物质	主轴	叶轮	隔套	平衡盘	其他零件	总计
煤	6.33E+03	1.04E+05	7.24E+02	6.31E+02	4.51E+03	1.16E+05
原油	2.98E+01	4.88E+02	3.40E+00	2.96E+00	2.12E+01	5.45E+02
天然气	1.47E+01	2.41E+02	1.68E+00	1.46E+00	1.05E+01	2.69E+02
CO	1.71E+00	2.80E+01	1.95E-01	1.70E-01	1.22E+00	3.13E+01
CO ₂	9.61E+03	1.57E+05	1.10E+03	9.57E+02	6.85E+03	1.76E+05
SO ₂	2.84E+01	4.66E+02	3.25E+00	2.83E+00	2.03E+01	5.21E+02
NO _x	2.67E+01	4.38E+02	3.05E+00	2.66E+00	1.90E+01	4.89E+02
CH ₄	2.80E+01	4.59E+02	3.20E+00	2.79E+00	2.00E+01	5.13E+02
H ₂ S	7.97E-02	1.31E+00	9.11E-03	7.94E-03	5.68E-02	1.46E+00
HCL	2.64E+00	4.32E+01	3.01E-01	2.63E-01	1.88E+00	4.83E+01
COD	8.24E-01	1.35E+01	9.42E-02	8.21E-02	5.88E-01	1.51E+01
NH ₃	4.20E-02	6.89E-01	4.80E-03	4.19E-03	3.00E-02	7.70E-01
烟尘	1.04E+03	1.71E+04	1.19E+02	1.04E+02	7.43E+02	1.91E+04

从表 3.3 可以看出，原材料生产阶段由于合金钢材料的需求量最多，合金钢的生产

消耗了大量的能源，并产生了严重的环境影响。其次为不锈钢。而碳钢材料的需求量最少，消耗了较少的能源，产生了较少的环境排放。

从表 3.4 可以看出，压缩机转子生产过程产生的排放物中二氧化碳的排放量显著大于其他排放物，为 176000kg，通过进一步分析会发现电力的生产，尤其煤电，是二氧化碳排放的主要来源。因此，减少二氧化碳排量也就追溯到了优化电力结构。在能源消耗方面，生产一套压缩机转子需要消耗 116000kg 的煤、545kg 的原油和 269kg 的天然气，通过进一步分析发现叶轮的加工过程消耗了最多能源，接近总能耗的 90%，接下来将重点分析叶轮的加工过程。

叶轮是离心压缩机的核心部件，叶轮的形状复杂，叶轮叶片的工作表面一般为自由曲面，加工难度大，能量消耗大，材料利用率低。叶轮的加工主要在于流道、叶片的粗加工和精加工，需要去除的材料占毛坯的一半以上。有必要重点分析叶轮的各个生产工艺过程的能源消耗和污染物排放，从环境影响的角度提出改进叶轮工艺方案的建议。

叶轮的加工工艺路线见图 3.4，各工序的工艺要求、加工设备和工时定额数据如表 3.5 所示，各工序的能量和辅料消耗数据如表 3.6 所示，工艺过程的能量消耗利用设备功率乘以加工时间计算得到，辅料消耗只能收集到一段时间内的总消耗量（如 1 年），然后以各工艺加工时间为基准分配到具体的工艺过程中，某些消耗量很小或环境影响很小的工艺辅料忽略不计。

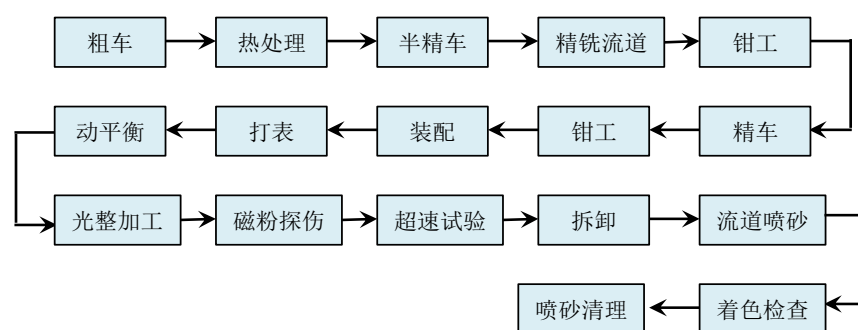


图 3.4 叶轮加工工艺流程

Fig.3.4 Impeller machining process

根据叶轮的生产数据，计算得到叶轮生产各工序的清单结果，如表 3.7 所示。从表中可以看出，能源消耗和环境排放最多的工序是叶轮流道的铣削，这是因为整体叶轮铣削过程非常复杂，需要消耗大量电能。最少的分别是钳、拆卸和着色，原因是这些工艺过程简单，仅仅依靠人力就能完成。

表 3.5 叶轮加工工艺路线

Tab.3.5 Impeller machining process

工序号	工序名称	工艺要求	加工设备	工时定额(h)
110	粗车	车内外圆及端面	C512	10
120	热处理	正火, 淬火, 回火	电炉或燃气炉	51
130	半精车	车内外圆及端面	C512	61
3130	铣削	精铣叶轮流道	SPEEDMAT4	610
3150	钳	修流道、圆 R、毛刺	/	20
3170	精车	精车各部	46"	46
3180	钳	修磨飞边、毛刺、清理各部	/	2
4240	装配	组装叶轮与芯轴	电炉	6
4250	打表	组合芯轴打表	打表机床	1.3
4270	动平衡	组合芯轴进行动平衡	H4V	8
4290	光整加工	外表面光整加工	46"	4
4300	磁粉	磁粉探伤检查	磁粉探伤仪	5
4320	超转	叶轮超速试验	BI5U	6
4340	拆卸	拆除动平衡芯轴	/	4
4350	喷砂	叶轮流道喷砂	喷砂机	1.3
4360	着色	叶轮着色检查	/	2

表 3.6 叶轮加工工艺过程的能量和辅料清单输入

Tab.3.6 Input of energy and accessories list in impeller machining process

工序号	工序名称	加工设备	设备功率 (kW)	设备电能消耗 (kW h)	辅料消耗 (kg)
110	粗车	立式车床 C512	24	254	4.73
120	热处理	电炉	75	1225	0
130	半精车	立式车床 C512	24	1550	28.9
3130	铣削	五轴加工中心 SPEEDMAT4	60	36800	288.8
3150	钳	/	/	0	0
3170	精车	数控立车车床 46	32	1572	21.8
3180	钳	/	/	0	0
4240	装配	电炉	75	460	0
4250	打表	打表机床	32	45	0
4270	动平衡	动平衡机 H4V	30	250	0
4290	光整加工	数控立车车床 46	32	138	1.89
4300	磁粉	磁粉探伤仪	304	25	0
4320	超转	超转试验台 BI5U	50	300	0
4340	拆卸	/	/	0	0
4350	喷砂	喷砂机	1.1	1.5	0
4360	着色	/	/	0	0

表 3.7 叶轮加工工艺过程的清单输出 (kg)

Tab.3.7 The inventory output of impeller machining process (kg)

工序号	煤	原油	天然气	CO	CO ₂	SO ₂	NO _x	CH ₄
粗车	148.0	0.884	1.32	0.052	231.0	0.805	0.665	0.683
热处理	715.0	4.26	6.37	0.251	1110.0	3.88	3.21	3.30
半精车	905.0	5.39	8.06	0.318	1410.0	4.91	4.06	4.17
铣削	21500.0	128.0	191.0	7.54	33500.0	117.0	96.4	99.0
钳	0	0	0	0	0	0	0	0
精车	918.0	5.47	8.17	0.322	1430.0	4.98	4.12	4.23
钳	0	0	0	0	0	0	0	0
装配	269.0	1.6	2.39	0.094	418.0	1.46	1.21	1.24
打表	26.3	0.157	0.234	0.0092	40.9	0.143	0.118	0.121
动平衡	146.0	0.87	1.30	0.0513	227.0	0.793	0.655	0.673
光整加工	80.6	0.48	0.718	0.0283	125.0	0.437	0.362	0.371
磁粉	14.6	0.087	0.13	0.0051	22.7	0.0793	0.0655	0.0673
超转	175.0	1.04	1.56	0.0615	273.0	0.951	0.786	0.807
拆卸	0	0	0	0	0	0	0	0
喷砂	0.876	0.0052	0.0078	0.00031	1.36	0.0048	0.00393	0.00404
着色	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.7 续

Tab.3.7 Cont

工序号	H ₂ S	HCL	COD	NH ₃	烟尘
粗车	0.000111	0.0653	0.021	0.000432	3.12
热处理	0.000534	0.315	0.101	0.00208	15.1
半精车	0.000676	0.398	0.128	0.00264	19.1
铣削	0.0160	9.46	3.04	0.0626	453.0
钳	0	0	0	0	0
精车	0.000685	0.404	0.13	0.00267	19.3
钳	0	0	0	0	0
装配	0.000201	0.118	0.038	0.000782	5.66
打表	0.0000196	0.0116	0.0037	0.0000765	0.554
动平衡	0.000109	0.0643	0.021	0.000425	3.08
光整加工	0.0000602	0.0355	0.0114	0.000235	1.70
磁粉	0.0000109	0.00643	0.0021	0.0000425	0.308
超转	0.000131	0.0771	0.0248	0.00051	3.69
拆卸	0	0	0	0	0
喷砂	0.00000065	0.00039	0.000124	0.0000026	0.0185
着色	0	0	0	0	0

3.2.2 运输和使用阶段

运输阶段在此主要考虑原材料运输和产品运输两个阶段，忽略工厂内等短距离运输，如图 3.5 所示。压缩机生产厂家位于沈阳市，原材料的供应商来自齐齐哈尔市，运输距离采用两城市的中心距离，因此沈阳至齐齐哈尔的平均距离 782km 可以作为原材料的运输距离。压缩机转子的运输是从沈阳的工厂直接运到输气站，其主要分布在以兰州市为中心的“西气东输”项目的输气管线上，因此沈阳至兰州的平均距离 2156km 可以作为产品的平均运输距离。

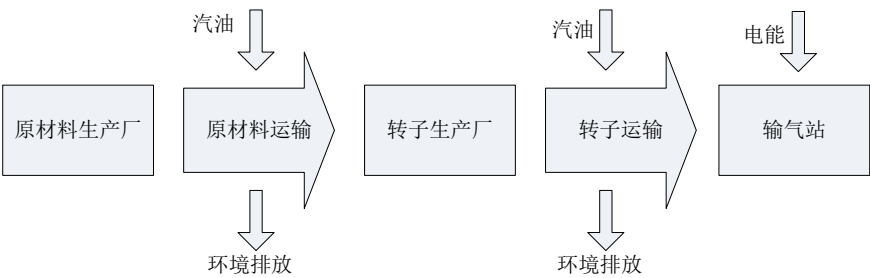


图 3.5 运输、使用阶段示意图

Fig.3.5 Transport and using phase diagram

表 3.8 运输、使用阶段的环境排放（kg）

Tab.3.8 The environmental emissions of Transport and using phase (kg)

清单物质	原材料运输阶段	产品运输阶段	使用阶段
煤	1.42E+01	1.23E+01	4.38E+05
原油	1.94E+02	1.68E+02	1.88E+03
天然气	3.20E+00	2.77E+00	4.02E+03
CO	4.99E+00	4.33E+00	1.25E+02
CO ₂	7.05E+02	6.11E+02	7.25E+05
SO ₂	8.72E-01	7.55E-01	2.31E+03
NO _x	2.14E+01	1.86E+01	2.12E+03
CH ₄	3.31E+00	2.87E+00	2.03E+03
H ₂ S	7.58E-04	6.57E-04	1.46E+00
HCL	5.08E-03	4.40E-03	2.10E+02
COD	1.39E+00	1.20E+00	5.32E+01
NH ₄	3.34E-02	2.90E-02	9.95E-01
烟尘	2.13E+00	1.85E+00	8.34E+04

运输工具我们假设统一采用载货量为 10t 的卡车，燃料为汽油。每吨货物单位运输距离的能源消耗和环境排放参考 LCA 数据库。压缩机转子的使用阶段，不考虑维护和保养，润滑油的消耗也相对比较小，因此只考虑电能的输入。在前面已经设定压缩机转

子的使用时间为 5 年，该压缩机的平均功率为 18.4MW，全天 24h 工作。因此压缩机转子在使用阶段消耗的电能为：

$$5 \times 365 \times 24 \times 18.4 \times 10^3 = 805920 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

原材料运输、产品运输和使用阶段的环境排放列于表 3.8。由于压缩机功率大、使用时间长，压缩机转子使用阶段的环境影响主要是能源消耗，为 805920kW h，远远大于其他所有生命周期阶段的能源消耗。

3.2.3 废弃处理阶段

废旧压缩机转子处理工艺流程如图 3.6 所示。

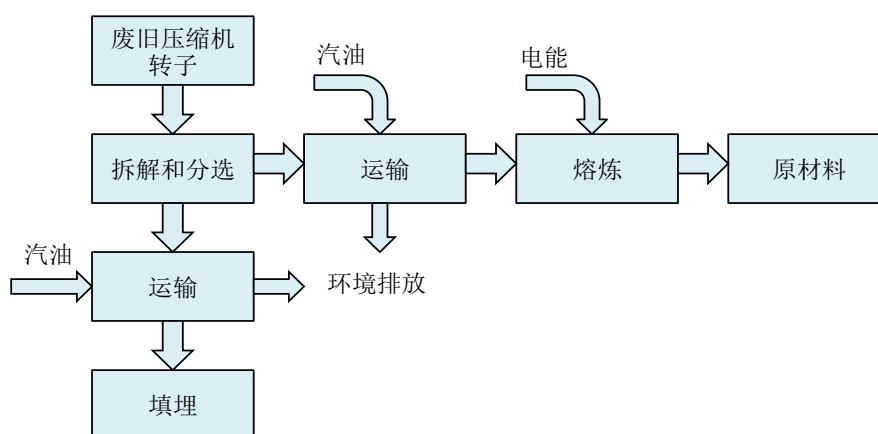


图 3.6 废旧压缩机转子处理工艺流程

Fig.3.6 Waste disposal diagram of compressor rotor

统计数据显示，废旧压缩机转子 85%的零部件可以回收，超过总质量的 90%^[30]。本研究假设回收零件的质量占总质量的 90%，大约 1.5t 钢材料被运送到附近的钢厂进行重新熔炼，大约 168kg 的废弃材料被运送到附近的垃圾填埋场。从输气站到冶炼厂和垃圾填埋场的运输距离分别约为 33km 和 30km。压缩机转子机械加工过程中产生的大约 3.5t 切屑运送到附近的炼钢厂，距离压缩机生产厂家大约 49km。我们假设回收熔炼后得到的钢材料全部用于压缩机转子的生产，形成一个循环系统。

因为废弃填埋的材料只占小部分，且填埋过程造成的环境影响很小，所以这部分环境影响可以忽略不计。在压缩机的废弃处置阶段也涉及到运输环节，同样假设使用载货量为 10t 的燃油卡车。本研究中，回收的材料采用一台功率为 600kW 的中频炉进行熔炼，

型号为 GW-1T, 熔炼每吨钢或合金大约消耗电量 $600\text{kW h}^{[30]}$ 。因此, 废弃处理阶段消耗的电量可以计算如下:

$$(1.5+3.5)\times 600=3000\text{kW h}$$

根据确立好的数据, 计算得到压缩机转子废弃处理阶段的清单结果如表 3.9 所示。可以看出压缩机废弃处理阶段的清单结果全部为负, 说明材料的回收利用对环境是有益的。能源消耗方面, 煤的消耗减少 4910kg , 原油消耗减少 1150kg , 天然气消耗减少 1140kg 。环境排放方面, CO_2 排放减少 16200kg 。还可以看出, 压缩机转子废弃处理阶段中的运输过程造成的环境影响较小。

表 3.9 压缩机转子废弃处理阶段清单结果 (kg)
Tab.3.9 The inventory results of waste disposal stage (kg)

名称	运输	熔炼	回收利用	总计
煤	9.13E-01	1.75E+03	-4.91E+03	-3.16E+03
原油	1.11E+01	1.04E+01	-1.15E+03	-1.13E+03
天然气	1.84E-01	1.56E+01	-1.14E+03	-1.12E+03
CO	4.05E+00	6.15E-01	-9.28E+01	-8.81E+01
CO ₂	2.85E+01	2.73E+03	-1.62E+04	-1.34E+04
SO ₂	4.59E-02	9.51E+00	-5.79E+01	-4.83E+01
NO _x	4.59E-01	7.86E+00	-3.72E+01	-2.89E+01
CH ₄	1.93E-01	8.07E+00	-3.49E+01	-2.66E+01
H ₂ S	4.43E-05	1.31E-03	-1.07E-01	-1.06E-01
HCL	3.35E-04	7.71E-01	-1.82E+00	-1.05E+00
COD	8.88E-02	2.48E-01	-5.04E+01	-5.01E+01
NH ₃	4.05E-03	5.10E-03	-6.16E-01	-6.07E-01
烟尘	2.11E-02	3.69E+01	-3.74E+02	-3.37E+02

3.2.4 全生命周期清单结果

在前面分别得到了压缩机转子在生命周期各个阶段的清单结果, 并分别做了分析。本节将压缩机转子各生命周期阶段的清单结果进行汇总, 得到全生命周期的总清单结果, 如表 3.10 所示。

通过压缩机转子整个生命周期的总清单结果可以看出, 压缩机转子的能源消耗最显著, 其中整个生命周期过程中消耗了 557000kg 的煤、 3100kg 的原油和 4590kg 的天然气。环境排放中二氧化碳的排放最明显, 为 909000kg , 通过前面的分析我们已经知道了二氧化碳排放的来源, 下一步就是寻求减少压缩机生命周期中二氧化碳排放的措施。同能源消耗和二氧化碳排放相比, 其他环境排放要小很多。还可以看出, 使用阶段的能耗和环境排放远远大于其他阶段。

表 3.10 压缩机转子全生命周期能源消耗、环境排放清单 (kg)

Tab.3.10 The inventory results of entire life cycle of compressor rotor (kg)

物质	原材料生产	原材料运输	转子制造	转子运输	使用	废弃处理	总计
煤	6.14E+03	1.42E+01	1.16E+05	1.23E+01	4.38E+05	-3.16E+03	5.57E+05
原油	1.44E+03	1.94E+02	5.45E+02	1.68E+02	1.88E+03	-1.13E+03	3.10E+03
天然气	1.42E+03	3.20E+00	2.69E+02	2.77E+00	4.02E+03	-1.12E+03	4.59E+03
CO	1.16E+02	4.99E+00	3.13E+01	4.33E+00	1.25E+02	-8.81E+01	1.94E+02
CO ₂	2.03E+04	7.05E+02	1.76E+05	6.11E+02	7.25E+05	-1.34E+04	9.09E+05
SO ₂	7.24E+01	8.72E-01	5.21E+02	7.55E-01	2.31E+03	-4.83E+01	2.86E+03
NO _x	4.65E+01	2.14E+01	4.89E+02	1.86E+01	2.12E+03	-2.89E+01	2.67E+03
CH ₄	4.36E+01	3.31E+00	5.13E+02	2.87E+00	2.03E+03	-2.66E+01	2.57E+03
H ₂ S	1.34E-01	7.58E-04	1.46E+00	6.57E-04	1.46E+00	-1.06E-01	2.95E+00
HCL	2.27E+00	5.08E-03	4.83E+01	4.40E-03	2.10E+02	-1.05E+00	2.60E+02
COD	6.30E+01	1.39E+00	1.51E+01	1.20E+00	5.32E+01	-5.01E+01	8.38E+01
NH ₃	7.70E-01	3.34E-02	7.70E-01	2.90E-02	9.95E-01	-6.07E-01	1.99E+00
烟尘	4.68E+02	2.13E+00	1.91E+04	1.85E+00	8.34E+04	-3.37E+02	1.03E+05

3.3 生命周期影响评价

3.3.1 生命周期影响评价建模

根据 ISO 确立的生命周期影响评价框架，建立了影响评价模型，如图 3.7 所示。

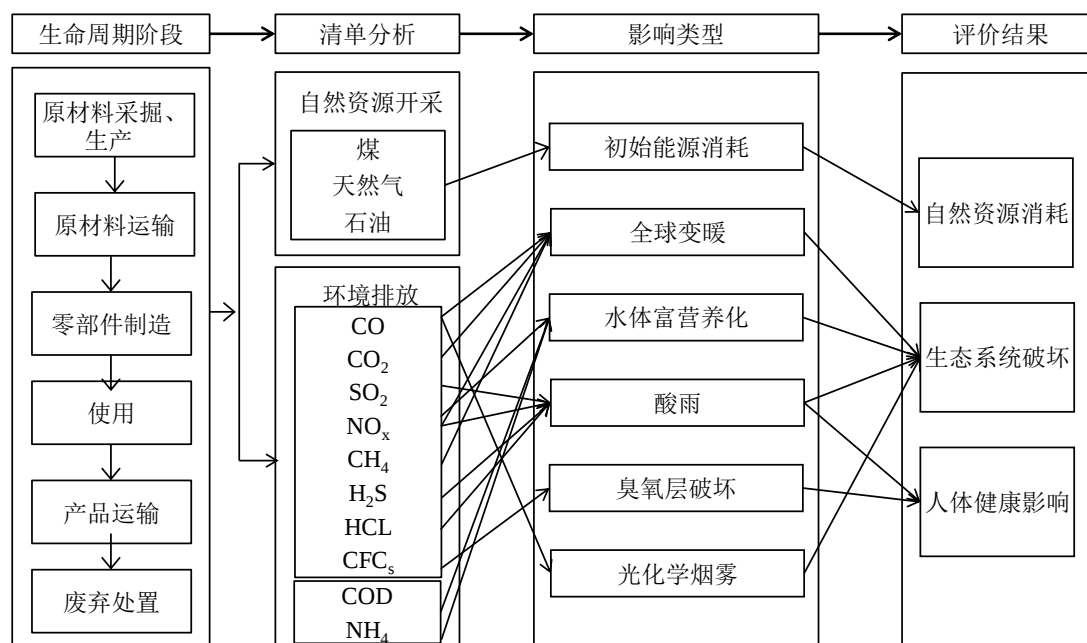


图 3.7 生命周期影响评价模型

Fig.3.7 Life cycle impact assessment model

生命周期影响评价是评估生命周期清单分析阶段确认的输入输出流（能源消耗和环境排放）对人体健康，生态系统质量和资源枯竭的潜在影响，建立产品与潜在环境影响之间的联系。生命周期影响评价是从互相独立的、分散的清单结果中得到有明确针对性的环境影响关联，找出明确的环境影响与产品系统的物质流和能量流的关联度。生命周期影响评价结果反映了产品的综合环境属性，识别在产品生命周期过程中哪种材料、哪个过程或哪个阶段的环境影响的大小，明确改进和重新设计的方向，为环境改进提供了参考的依据，指导产品的绿色设计。生命周期影响评价提供了一个系统的流程来分类和表征环境影响类型。生命周期影响评价主要分为四步：分类、特征化、标准化和加权评估，如图 3.8 所示。ISO14042^[46]规定分类和特征化是进行生命周期影响评价的必要步骤，标准化和加权评估的选择取决于研究目标和研究范围，下面分别介绍这四个技术步骤。

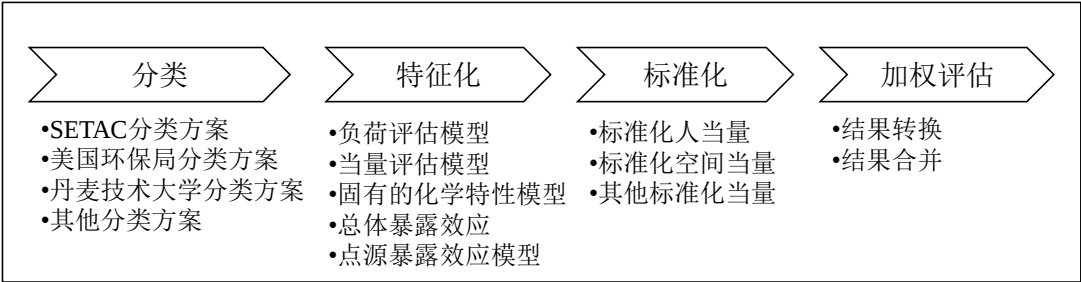


图 3.8 生命周期影响评价技术步骤

Fig.3.8 The technical steps of life cycle impact assessment

（1）分类

在生命周期影响评价中，影响的定义是产品系统的输入输出流（能源消耗和环境排放）对人体健康、生态系统质量和自然资源引起的结果。生命周期影响类型的划分与研究目标密切相关，首先明确与研究目标相关的影响类型，然后将清单物质分别归类到相应的影响类型中（例如，将二氧化碳排放归类到全球变暖中）。一种环境影响类型通常包括多种清单物质，而一种清单物质也可能归为多种影响类型。表 3.11 列出了一些比较常用的生命周期影响类型。

（2）特征化

特征化是利用科学的转换因子（特征化因子、当量因子）将不同的清单物质转化和汇总为相应的环境影响指标。特征化提供了一种直接使用影响类型来比较生命周期清单结果的方法，换句话说，特征化因子将不同的清单物质转化成了可以直接比较的同单位的环境影响指标。例如，将各种温室气体全部转化成 CO₂ 的当量形式。

表 3.11 常用的生命周期影响类型

Tab.3.11 Commonly used life cycle impact categories

影响类型	影响范围	清单物质举例
全球变暖	全球	CO ₂ 、NO ₂ 、CH ₄ 、CFC _s 、HCFC _s 、CH ₃ Br
臭氧层损耗	全球	CFC _s 、HCFC _s 、CH ₃ Br
酸化	区域、地方	SO _x 、NO _x 、HCL、HF、NH ₄
富营养化	地方	PO ₄ 、NO、NO ₂ 、NH ₄
光化学烟雾	地方	NMHC
陆生生物毒性	地方	有毒化学品
水生生物毒性	地方	有毒化学品
人体健康	全球、区域、地方	排放到空气、水和土壤中的全部物质
资源耗竭	全球、区域、地方	矿物质和化石燃料
土地利用	全球、区域、地方	垃圾填埋
水的利用	区域、地方	水的消耗

特征化的计算公式可以写成：

$$S_k = \sum EI_s \times CF_s \quad (3.1)$$

其中， S_k 表示第 k 种环境影响指标特征化结果， EI_s 表示清单物质 s 的质量， CF_s 表示 s 物质的特征化因子。

在特征化中，选择合适的特征化因子是非常关键的，特征化因子的选择应该和研究目标与研究范围相关。对于一些影响类型，如全球变暖和臭氧层破坏，有一致接受的特征化因子，然而其他影响类型的特征化因子还需进一步发展，形成统一的标准。

(3) 标准化

标准化是将各个特征化的结果除以选定的参考值，转化成可以互相比较相对大小的影响指标，从而得到各个环境影响类型的贡献大小。标准化参考值的选择同样应该和研究目标与研究范围相关。标准化的计算公式可以写成：

$$N_k = S_k / R_k \quad (3.2)$$

其中， N_k 表示第 k 种环境影响类型的标准化结果， R_k 表示第 k 种环境类型的标准化参考值。

(4) 加权评估

加权是基于不同影响类型的重要性或关联性分配相应的权重，可以使不同的影响类型结合成一个综合环境影响指标。加权评估的计算公式可以写成：

$$W = \sum V_k N_k \quad (3.3)$$

其中， W 表示环境影响综合值， V_k 表示第 k 种环境类型的权重。

尽管权重被广泛应用于生命周期评价，但是该阶段是生命周期评价中最不完善的步骤，主要问题是其主观性，环境影响类型的相对重要性是主观的判断。需要注意的是，在某些情况下，单独呈现的影响评价结果往往足以进行决策支持，尤其当结果比较明显的时候。

3.3.2 生命周期影响评价方法的选择

生命周期影响评价方法众多，根据研究目的可以分为两大类：中间点法和终结点法。中间点法关注的是环境影响因子和影响机理，是一种面向问题的方法。终结点法着眼于最终的损害情况，是一种以造成的损害为导向的方法。中间点法主要有 EDIP 方法、CML2001 方法、EPS 方法等，终结点法主要有 Eco-indicator95 方法、Eco-indicator99 方法、ReCiPe2008 方法等。本研究采用“CML-2001”影响评价方法，CML-2001 是基于传统生命周期清单分析的一种面向问题的方法，模型相对简单，所需的假设条件少^[47]。

特征化因子、标准化参考值和权重因子如表 3.12 所示。

表 3.12 特征化因子、标准化参考值和权重因子

Tab.3.12 Characterization factor, normalization reference value and weighting factor

影响类型	清单物质	特征化因子	单位	标准化参考值	权重因子
PED	煤	0.714	kg ce 当量	828	3.3
	石油	1.429			
	天然气	1.693			
GWP	CO	2	kg CO ₂ 当量	8700	21.6
	CO ₂	1			
	CH ₄	25			
	NO _x	320			
AP	SO ₂	1	kg SO ₂ 当量	36	0.05
	NO _x	0.7			
	H ₂ S	1.88			
	HCL	0.88			
EP	NO _x	1.35	kg NO ₃ 当量	62	3.0
	NH ₃	3.64			
	COD	0.23			
POCP	CO	0.03	kg C ₂ H ₄ 当量	0.65	0.2
	CH ₄	0.007			

根据研究目标和范围，本文选择了五种环境影响类型：初始能源消耗（PED），包括三种不可再生资源（煤炭、原油和天然气），以标准煤（ce）当量表示；全球变暖潜力（GWP），包括 CO₂，CH₄，NO_x，CO 等气体，以 CO₂ 当量表示；酸化潜力（AP），包括 SO₂，NO_x，H₂S，HCL 等气体，以 SO₂ 当量表示；富营养化潜力（EP），包括 NH₃，

NO_x 和 COD 等气体和水体排放, 由 NO_3 当量表示; 光化学臭氧生成潜力 (POCP), 包括 CO 和 CH_4 等气体, 由 C_2H_4 当量表示。特征化因子来源于 GB/T2589-2008^[48]和 IPCC2007/2012^[49], 标准化参考值参考 Laurent 等人的研究成果^[50], 权重因子引用相关文献^[51]。

3.3.3 转子生命周期阶段环境影响评价

根据前面确立的特征化模型和特征化因子, 计算得到压缩机转子各个生命周期阶段的环境影响的特征化结果, 分别用表 3.13 和图 3.9 表示。

表 3.13 各个生命周期阶段环境影响的特征化结果 (kg)
Tab.3.13 The characterization results of every life cycle stage (kg)

影响类型	原材料生产	原材料运输	转子生产	转子运输	使用	废弃处理
PED	8.85E+03	2.93E+02	8.41E+04	2.54E+02	3.22E+05	-5.77E+03
GWP	3.65E+04	7.65E+03	3.45E+05	6.64E+03	1.45E+06	-2.35E+04
AP	1.07E+02	1.59E+01	9.09E+02	1.38E+01	3.98E+03	-6.97E+01
EP	8.01E+01	2.93E+01	6.66E+02	2.55E+01	2.88E+03	-5.27E+01
POCP	3.79E+00	1.73E-01	4.53E+00	1.50E-01	1.80E+01	-2.83E+00

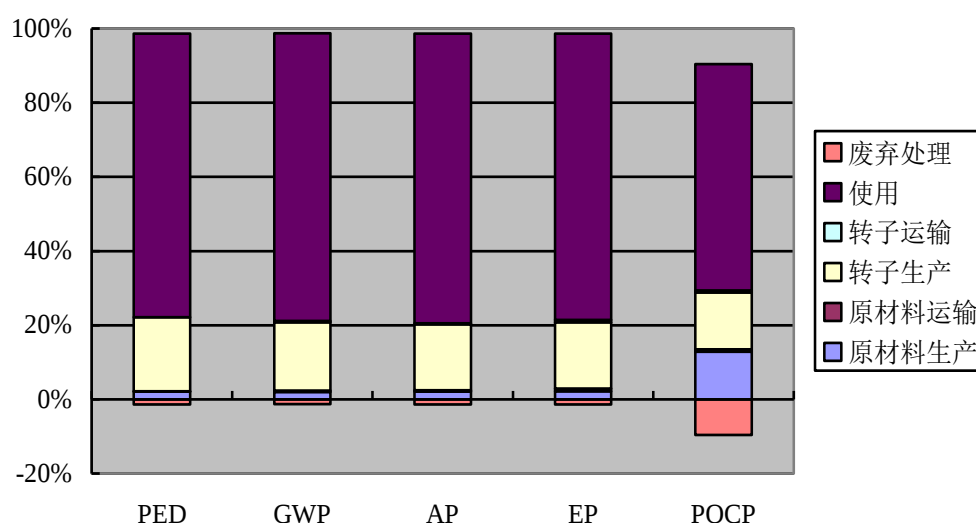


图 3.9 不同影响类型中各个生命周期阶段的环境影响比例

Fig.3.9 The share of every life cycle stage in different impact categories

从图 3.9 可以看出, 由于压缩机功率较高, 且使用年限较长, 每年消耗大约 161184kW h 的电能, 所有环境影响类型中使用阶段的影响占了绝大部分 (75%), 远远大于其他生命周期阶段。除了使用阶段, 转子生产阶段的环境影响最大, 也产生了较多的环境影响 (18%), 这主要是因为转子机械制造过程复杂, 且体积庞大, 生产阶段

的机械加工过程也会消耗大量电能。从图 3.9 还可以明显看出，废弃处置阶段的环境影响结果均为负值，说明回收再利用的处理方式有益于环境。原材料生产是排第三位的环境影响阶段，在压缩机转子的整个生命周期中，原材料生产阶段的环境影响只占了小部分，仅高于运输阶段，这主要是因为在该阶段消耗了相对少的材料和能源。但是在 POCP 影响类型中，原材料生产阶段的环境影响明显较大，这是因为在原材料生产阶段，合金生产排放了较多的 CO，因此导致 POCP 相对较高。运输阶段的环境影响最小，运输过程消耗了少量的能源，产生了较少的环境排放。由于压缩机转子的运输距离要大于原材料的运输距离，所以环境影响也要大些。

根据前面确立的标准化模型和标准化参考值，计算得到压缩机转子各个生命周期阶段的环境影响的标准化结果，如表 3.14 所示。特征化使环境影响类型之间可以直接比较相对大小，从而得到在压缩机转子每个生命周期阶段中各个环境影响类型的贡献大小，如图 3.10 表示。

表 3.14 各个生命周期阶段的环境影响的标准化结果
Tab.3.14 The normalization results of every life cycle stage

影响类型	原材料生产	原材料运输	转子生产	转子运输	使用	废弃处理
PED	1.07E+01	3.54E-01	1.02E+02	3.07E-01	3.89E+02	-6.97E+00
GWP	4.20E+00	8.79E-01	3.97E+01	7.63E-01	1.67E+02	-2.70E+00
AP	2.97E+00	4.42E-01	2.53E+01	3.83E-01	1.11E+02	-1.94E+00
EP	1.29E+00	4.73E-01	1.07E+01	4.11E-01	4.65E+01	-8.50E-01
POCP	5.83E+00	2.66E-01	6.97E+00	2.31E-01	2.77E+01	-4.35E+00

从图 3.10 可以看出，压缩机转子生产阶段的各个环境影响类型的贡献比例和使用阶段的相同，这是因为这两个阶段的主要输入都是电能，PED 占比第一，为 55%。由于电力生产中煤炭燃烧会排放大量温室气体，如 CO₂、CH₄ 和 NO_x，所以 GWP 占比第二，为 22%。AP 和 EP 的比例分别为 13%和 7%。POCP 占了最小比例，仅为 3%，主要因为 POCP 只和 CO 和 CH₄ 相关，它们的排放相对较少。原材料运输和转子运输阶段，GWP 的环境影响最高，占比 40%。PED、AP 和 EP 的占比相差不大，大约均为 16%。POCP 的占比最小，为 12%，这是因为该阶段的环境影响主要和汽车尾气排放有关，尾气成分中包含了大量的 CO₂。

从图 3.10 还可以明显看出，原材料生产阶段和废弃处置阶段中各环境影响类型贡献情况相同，但是呈现一正一负，这是因为废弃处理阶段采用材料回收利用的方法节约了原材料的生产。PED 占比最高，为 42%，这是因为金属冶炼消耗了较多的能源。值得注

意的是 POCP 占比第二，为 21%，这是因为合金的冶炼过程中产生了较多的 CO 气体。GWP、AP 和 EP 的占比较小，分别为 17%、12%和 8%。

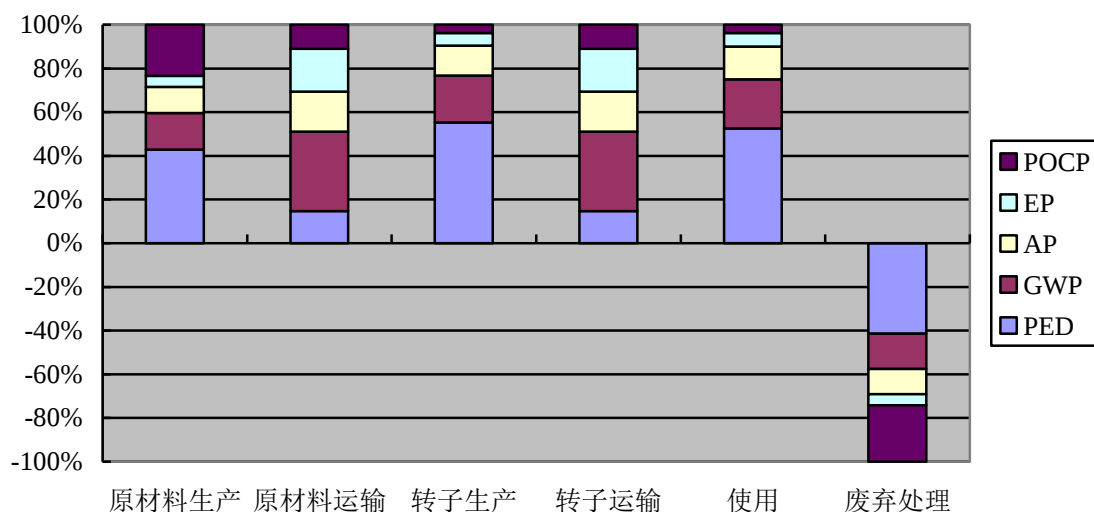


图 3.10 不同生命周期阶段中各个环境影响类型的贡献大小

Fig.3.10 The share of every impact category in different life cycle stages

3.3.4 转子生产阶段环境影响评价

从上面的分析已经得到压缩机转子的使用阶段和生产阶段是两个主要的环境影响阶段。使用阶段的环境影响情况比较简单，主要是运行过程的电力消耗。转子生产阶段的机械制造过程复杂，且体积庞大，有必要对该阶段进行详细的环境影响评价分析。转子生产阶段环境影响评价的特征化结果、标准化结果和加权评估结果分别见表 3.15、表 3.16 和表 3.17。

表 3.15 压缩机转子生产阶段环境影响的特征化结果 (kg)

Tab.3.15 The characterization results of manufacture stage (kg)

影响类型	主轴	叶轮	隔套	平衡盘	其他零件	总和
PED	4.59E+03	7.54E+04	5.25E+02	4.57E+02	3.27E+03	8.41E+04
GWP	1.89E+04	3.09E+05	2.16E+03	1.88E+03	1.34E+04	3.45E+05
AP	4.96E+01	8.13E+02	5.67E+00	4.94E+00	3.54E+01	9.09E+02
EP	3.64E+01	5.97E+02	4.16E+00	3.63E+00	2.59E+01	6.66E+02
POCP	2.47E-01	4.05E+00	2.83E-02	2.46E-02	1.77E-01	4.53E+00

表 3.16 压缩机转子生产阶段环境影响的标准化结果

Tab.3.16 The normalization results of manufacture stage

影响类型	主轴	叶轮	隔套	平衡盘	其他零件	总和
PED	5.54E+00	9.11E+01	6.34E-01	5.52E-01	3.95E+00	1.02E+02
GWP	2.17E+00	3.55E+01	2.48E-01	2.16E-01	1.54E+00	3.97E+01
AP	1.38E+00	2.26E+01	1.58E-01	1.37E-01	9.83E-01	2.53E+01
EP	5.87E-01	9.63E+00	6.71E-02	5.85E-02	4.18E-01	1.07E+01
POCP	3.80E-01	6.23E+00	4.35E-02	3.78E-02	2.72E-01	6.97E+00

表 3.17 压缩机转子生产阶段环境影响的加权求和

Tab.3.17 The weighting results of manufacture stage

制造过程	主轴	叶轮	隔套	平衡盘	其他零件	总和
环境影响综合值	6.71E+01	1.10E+03	7.67E+00	6.68E+00	4.77E+01	1.23E+03
占比	5.5%	89.4%	0.65%	0.55%	3.9%	100%

图 3.11 表示了压缩机转子生产阶段的各个零件部件制造的综合环境影响结果,从图中可以看出叶轮生产的环境影响远远大于其他部分,因此压缩机转子生产阶段的环境改善应该重点在于叶轮的生产环节,其次主轴的环境影响也比较明显,隔套、平衡盘以及其他小型零件生产造成的环境影响较小。

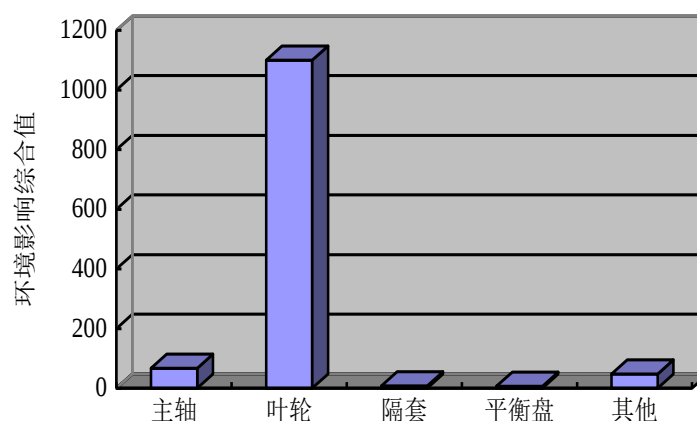


图 3.11 压缩机转子生产过程贡献图

Fig.3.11 The process contribution diagram of rotor manufacturing

3.3.5 叶轮加工过程环境影响评价

从上面的分析已经知道叶轮的制造是压缩机转子生产阶段环境影响最大的环节,本节进一步分析叶轮加工过程的环境影响。根据叶轮机械加工工艺过程的清单结果,进行环境影响评价,得到叶轮加工各工序环境影响的标准化结果和加权结果如表 3.18 所示。

表 3.18 叶轮加工过程环境影响评价结果

Fig.3.18 The environmental impacts of impeller machining process

工序	PED	GWP	AP	EP	POCP	环境影响综合值
粗车	0.1318	0.0529	0.0369	0.0145	0.00969	1.6269
热处理	0.6369	0.2552	0.1781	0.0703	0.04769	7.8435
半精车	0.8061	0.3235	0.225	0.0890	0.06	9.9375
铣削	19.1513	7.6825	5.3564	2.1140	1.4154	236.0351
钳	0	0	0	0	0	0
精车	0.8177	0.3281	0.228	0.0903	0.06	10.0807
钳	0	0	0	0	0	0
装配	0.2396	0.0961	0.0669	0.0265	0.01769	2.9535
打表	0.0234	0.0094	0.0064	0.00258	0.00172	0.2885
动平衡	0.1300	0.0521	0.0364	0.01435	0.00969	1.6020
光整	0.0717	0.0287	0.02	0.0079	0.00538	0.8838
磁粉	0.0130	0.0052	0.0036	0.00144	0.000954	0.1602
超转	0.1558	0.0626	0.0436	0.0172	0.01154	1.9233
拆卸	0	0	0	0	0	0
喷砂	0.00078	0.00031	0.00022	0.0000584	0.0000584	0.0096
着色	0	0	0	0	0	0

为了方便比较叶轮加工工艺过程环境影响的相对大小,将环境影响综合值较大的工艺过程用图 3.12 表示。从图中可以看出,叶轮铣削过程的环境影响显著大于其他工艺过程,因此该工艺过程是改进的重点。除了铣削过程,精车、半精车和热处理的环境影响也比较明显。装配、超转、粗车、动平衡和光整加工等过程的环境影响较小。

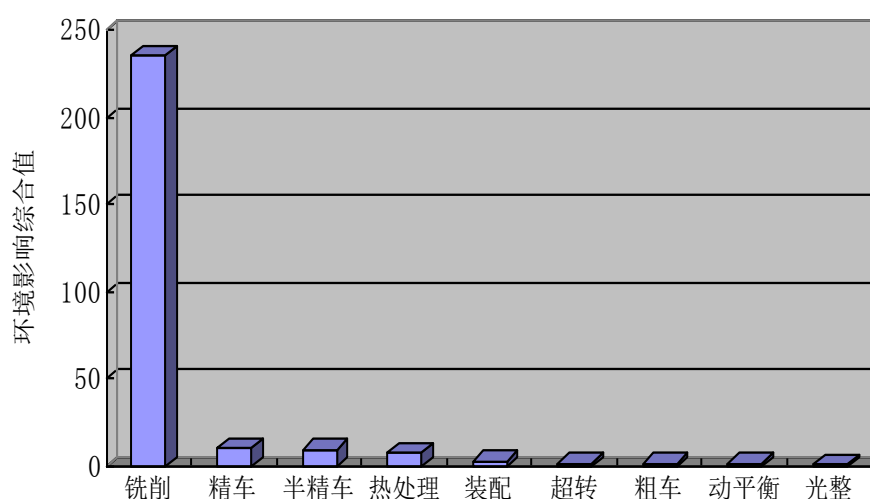


图 3.12 叶轮加工各工序环境影响贡献图

Fig.3.12 The environmental impacts contribution diagram of machining process of impeller

3.4 本章小结

本章基于过程清单分析方法对 PCL803 离心压缩机转子进行了生命周期评价。首先确立了研究对象、研究目标、系统边界、假设条件和数据收集方法，然后分别针对压缩机转子各个生命周期阶段进行了详细的清单分析，包括原材料生产、原材料运输、转子生产、转子运输、使用和废弃处理。最后对压缩机转子进行了详细的环境影响评价，包括转子生命周期阶段环境影响评价、转子生产阶段环境影响评价和叶轮加工过程环境影响评价，结果显示压缩机转子使用阶段的所有环境影响指标都远远大于其他阶段，其次为转子生产阶段，生产阶段中的叶轮加工过程的环境影响最为明显，叶轮加工过程中的铣削工艺过程的环境影响最为突出。

4 基于混合清单分析的压缩机转子生命周期评价

4.1 压缩机转子投入产出生命周期清单分析

技术系数矩阵 A 来源于 2012 年中国投入产出表^[52], 该表将国民经济划分为 139 个部门, 为了与环境影响系数相匹配, 将其合并为 26 个部门。环境影响系数矩阵 R 的计算中, 部门环境排放 C_i 从 2012 年中国环境统计年鉴^[53]、2012 年中国能源统计年鉴^[54]和相关文献查得, X_i 直接从 2012 年投入产出表获取。最终需求向量 $F = (0, 0, 0, \dots; 1000000, \dots, 0, 0, 0)^T_{26 \times 1}$, 其中 $f_{16}=1000000$ 表示一台压缩机转子的价格, 其他元素均为 0。通过矩阵求逆和乘法运算得到压缩机转子生命周期清单结果 E 如表 4.1 所示。

从表 4.1 可以看出, 能源消耗较明显, CO_2 和 SO_2 的排放明显大于其他清单物质。为了清楚表示不同经济部门的环境影响情况, 将能源消耗和 SO_2 排放分别用图 4.1 和图 4.2 表示。

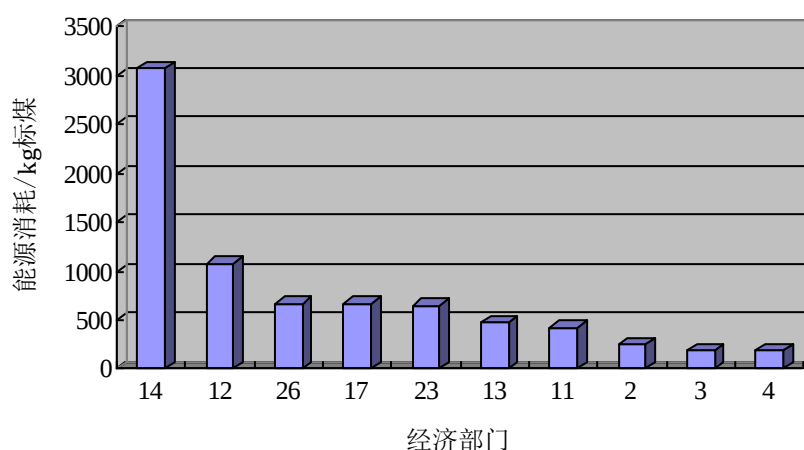


图 4.1 投入产出分析中能源消耗的主要经济部门

Fig.4.1 The main economic sectors of energy consumption from IO-LCA

图 4.1 表示了压缩机转子生命周期中消耗能源最多的前 10 个经济部门。从图中可以看出, 压缩机转子生命周期中能源消耗的主要经济部门从多到少分别为: 14.金属冶炼及压延加工业, 12.化学工业, 26.其他部门, 17.交通运输设备制造业, 23.电力、热力的生产和供应业, 13.非金属矿物制品业, 11.石油加工、炼焦及核燃料加工业, 2.煤炭开采和洗选业, 3.石油和天然气开采业, 4.金属矿采选业, 其中 14.金属冶炼及压延加工业的能源消耗远远大于其余部门。因此在制定节能减排策略时针对重点行业部门进行改善可以有效降低压缩机转子涉及到的能源消耗。

表 4.1 压缩机转子生命周期中各部门能耗与环境排放清单 (kg)

Tab.4.1 The inventory results of economic sectors in compressor rotor life cycle (kg)

部门	能源消耗 (标煤)	CO ₂	SO ₂	NO _x	CH ₄	烟尘
1.农林牧渔业	1247.5	1628.6	2.6	0.006	234.4	1.93
2.煤炭开采和洗选业	4937.0	6244.0	10.6	3.13	1122.7	9.58
3.石油和天然气开采业	3831.0	4897.3	2.5	3.1	22.8	0.31
4.金属矿采选业	3716.7	1591.8	12.1	2.15	0.28	8.46
5.非金属矿及其他矿采选业	599.7	521.8	3.1	0.75	0.022	4.26
6.食品制造及烟草加工业	734.0	707.0	5.0	2.75	0.34	0.15
7.纺织业	1038.6	534.2	4.1	1.29	0.11	0.025
8.纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	225.9	152.1	0.54	0.23	0.051	0.008
9.木材加工及家具制造业	421.4	311.5	1.4	0.66	0.035	1.29
10.造纸印刷及文教体育用品制造业	1509.2	1234.2	16.9	8.17	1.37	0.31
11.石油加工、炼焦及核燃料加工业	8496.9	9325.9	35.5	24.25	0.361	13.43
12.化学工业	21418.7	22337.3	76.9	39.69	1.41	9.14
13.非金属矿物制品业	9530.6	48080.1	69.7	128.39	0.24	208.4
14.金属冶炼及压延加工业	61267.0	114987.0	217.5	125.93	0.75	117.9
15.金属制品业	1665.2	629.1	2.6	1.40	0.047	0.76
16.通用、专用设备制造业	3317.9	3210.3	4.7	1.52	0.099	2.02
17.交通运输设备制造业	13313.9	10166.3	20.7	9.0	0.67	18.48
18.电气机械及器材制造业	875.7	369.9	0.59	0.27	0.023	0.028
19.通信设备、计算机及其他电子设备制造业	636.5	189.0	0.42	0.16	0.013	0.076
20.仪器仪表及文化办公用机械制造业	223.8	77.8	0.14	0.035	0.035	0.0086
21.工艺品及其他制造业	365.7	178.7	0.099	0.38	0.17	0.28
22.废品废料	53.2	28.4	0.11	0.19	0.058	0.17
23.电力、热力的生产和供应业	12966.9	186172.7	723.7	715.03	4.65	0.84
24.燃气生产和供应业	304.2	246.8	1.23	0.54	0.062	0.23
25.水的生产和供应业	390.2	39.1	0.015	0.00005	0.061	0
26.其他部门	13348.1	13632.1	1.29	0	5.03	0.27
总和	166436.1	427492.9	1214.1	1069.0	1395.9	398.3

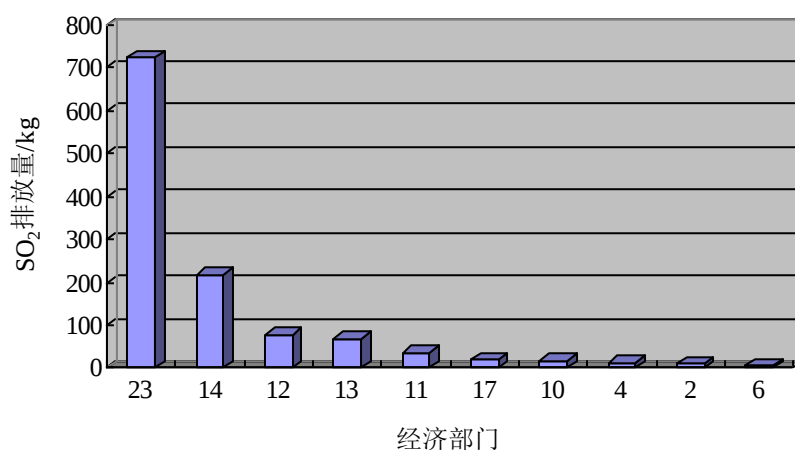
图 4.2 投入产出分析中 SO₂ 排放的主要经济部门Fig.4.2 The main economic sectors of SO₂ emission from IO-LCA

图 4.2 表示了压缩机转子生命周期中 SO₂ 排放最多的前 10 个经济部门。从图中可以看出，前 5 个部门的 SO₂ 排放较明显分别为：23.电力、热力的生产和供应业，14.金属冶炼及压延加工业，12.化学工业，13.非金属矿物制品业，11.石油加工、炼焦及核燃料加工业。其中，电力、热力的生产和供应业排放的 SO₂ 显著大于其余部门，这是因为电能生产中的煤炭燃烧会排放较多的 SO₂，金属冶炼及压延加工业也产生了较多的 SO₂，因此控制 SO₂ 的排放重点在于这两个部门。

4.2 压缩机转子的混合清单分析

4.2.1 压缩机转子的层次混合清单分析

图 4.3 表示了基于层次混合分析的压缩机转子生命周期评价的系统边界。在层次混合分析中，原材料生产、原材料运输、转子制造、转子运输、使用和废弃处置阶段采用过程分析方法，这部分在第二章已经进行了详细的分析。剩下的上游生产阶段采用投入产出分析方法，技术系数矩阵 A 直接从 2012 年中国投入产出表^[52]获得，环境影响系数矩阵 R 从 2012 年中国环境统计年鉴^[53]、2012 年中国能源统计年鉴^[54]和相关文献^[55]获得。

本研究中的压缩机转子过程分析的树状流程图可以划分为 4 层，如图 4.4 表示，所以过程分析的深度可以设定为 $k=4$ ，然后根据系统不完整因子 SIF 将重复计算的部分从投入产出分析结果中减去。最后将两部分的清单结果相加得到 E_{TH} ，清单结果汇总到表 4.2。

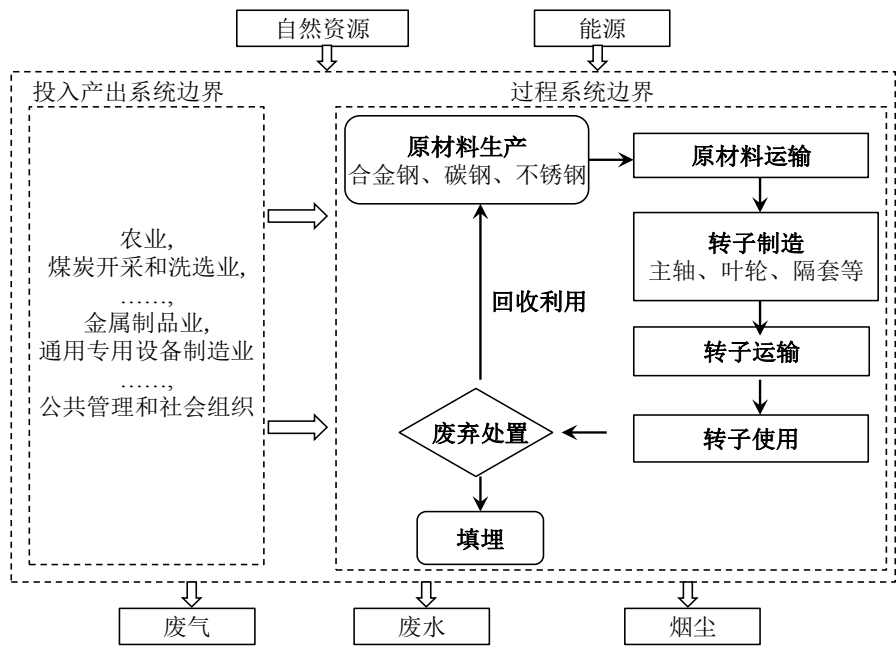


图 4.3 层次混合分析的系统边界
Fig.4.3 The system boundary of TH-LCA

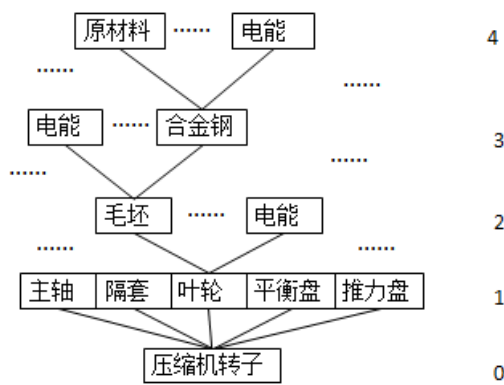


图 4.4 简化的压缩机转子生产过程树状图
Fig.4.4 Simplified production process tree diagram of compressor rotor

4.2.2 压缩机转子基于投入产出混合清单分析

图 4.5 表示了基于投入产出的混合分析的压缩机转子生命周期评价的系统边界。使用

和废弃处置阶段采用基于过程的分析方法，“使用前”的阶段（包括原材料生产、原

材料运输、转子制造和转子运输)以经济流的形式加入到投入产出表中,并进行“压缩机转子制造业”的部门拆分,然后通过投入产出分析方法计算得到“使用前”所有生命周期阶段的清单结果,最后加上使用和报废处置阶段的结果得到整个生命周期的清单结果。

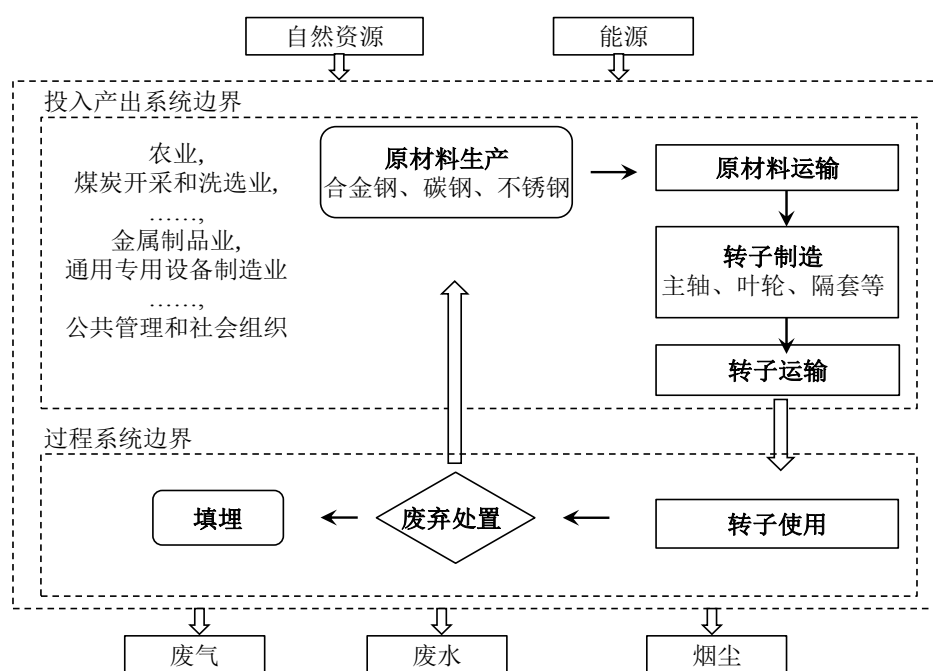


图 4.5 基于投入产出混合分析的系统边界

Fig.4.5 The system boundary of IOH-LCA

本研究中的压缩机转子产品属于“16 通用和专用设备制造业”。根据上一节的拆分流程,将“16 通用和专用设备制造业”拆分为两个新部门:“27 压缩机转子制造业”和“16 通用和专用设备制造业(除了压缩机转子)”。因此原矩阵 $A_{26 \times 26}$ 中的 26 个部门被拆分成了 27 个部门。拆分后的矩阵 $A'_{27 \times 27}$ 中的新向量 $a'_{i,27}$ 的计算需要详细的价格数据,将基于过程的物质流转化成投入产出表中的经济流。价格数据从压缩机转子的成本明细表和价格统计年鉴获得。向量 $a'_{i,16}$ 中的元素根据方程 (2.12) 计算。变量 s 是压缩机转子的价格与通用和专用设备的平均价格之间的比值。向量 $a'_{i,27}$ 根据方程 (2.13) 进行计算,向量 $a'_{i,16}$ 根据方程 (2.14) 进行计算。完成了技术系数矩阵的分解后,环境影响系数矩阵也要进行相应的拆分,环境影响系数矩阵 $R'_{11 \times 27}$ 中的新向量 $r_{i,27}$ 根据 LCA 数据库中的相关数据进行计算,向量 $r_{i,16}$ 则根据方程 (2.16) 进行计算。用投入产出分析

组成。矩阵 $R_{11 \times 6}^*$ 的确定参考 CLCD 数据库，矩阵 $R_{11 \times 26}$ 与投入产出分析中的相同。该模型中的最终需求向量定义为： $F_{IH} = (0, 0, 0, 0, 1, 0, \dots, 0)^T_{32 \times 1}$ ，只有 f_5 为 1，代表一台压缩机转子，其他元素均为 0。将各矩阵带入公式 (2.18) 计算得到 E_{IH} 。

通过不同方法计算得到的压缩机转子生命周期清单结果如表 4.4 所示，可以看出在压缩机转子的整个生命周期中能源消耗和 CO_2 排放显著大于其他清单物质，其次为能源消耗。还可以看出集成生命周期清单分析结果最大，投入产出生命周期清单分析结果最小，层次混合分析结果和基于投入产出的混合分析结果相差较小。针对不同方法评价结果的差距大小和原因，在影响评价中将做进一步分析。

表4.2 基于层次混合分析的压缩机转子生命周期清单结果 (kg)

Tab.4.2 Life cycle inventory of compressor rotor based on TH-LCA (kg)

类型	清单物质	投入产出子系统 (修正前)	投入产出子系统 (修正后)	过程子系统	总和
能源	ce	166436.1	41609.025	406000.00	447609.03
空气排放	CO_2	427492.9	106873.23	909000.00	1015873.23
	CO	1356.4	339.1	194.00	533.10
	SO_2	1214.1	303.525	2860.00	3163.53
	NO_x	1069	267.25	2670.00	2937.25
	CH_4	1395.9	348.975	2570.00	2918.98
	H_2S	2.52	0.63	2.95	3.58
	HCL	70.6	17.65	260.00	277.65
	Dust	398.3	99.575	103000.00	103099.58
水体排放	COD	204.24	51.06	83.80	134.86
	NH_3	4.2	1.05	1.99	3.04

表4.3 基于投入产出混合分析的压缩机转子生命周期清单结果 (kg)

Tab.4.3 Life cycle inventory of compressor rotor based on IOH-LCA (kg)

类型	清单物质	“使用前”阶段	使用阶段	废弃处置阶段	总和
能源	ce	2.00E+05	2.30E+05	-4.89E+03	4.25E+05
空气排放	CO_2	2.74E+05	7.25E+05	-1.34E+04	9.86E+05
	CO	4.47E+02	1.25E+02	-8.81E+01	4.84E+02
	SO_2	8.12E+02	2.31E+03	-4.83E+01	3.07E+03
	NO_x	7.62E+02	2.12E+03	-2.89E+01	2.85E+03
	CH_4	8.24E+02	2.03E+03	-2.66E+01	2.83E+03
	H_2S	2.00E+00	1.46E+00	-1.06E-01	3.35E+00
	HCL	6.18E+01	2.10E+02	-1.05E+00	2.71E+02
	Dust	1.80E+04	8.34E+04	-3.37E+02	1.01E+05
水体排放	COD	1.19E+02	5.32E+01	-5.01E+01	1.22E+02
	NH_3	2.39E+00	9.95E-01	-6.07E-01	2.78E+00

表4.4 不同分析方法的生命周期清单结果汇总 (kg)

Tab.4.4 The life cycle inventory of compressor rotor based hybrid analysis (kg)

类型	清单物质	P-LCI	IO-LCI	TH-LCI	IOH-LCI	IH-LCI
能源	ce	4.06E+05	1.66E+05	4.48E+05	4.25E+05	5.10E+05
空气排放	CO ₂	9.09E+05	4.27E+05	1.02E+06	9.86E+05	1.18E+06
	CO	1.94E+02	1.36E+03	5.33E+02	4.84E+02	5.81E+02
	SO ₂	2.86E+03	1.21E+03	3.16E+03	3.07E+03	3.68E+03
	NO _x	2.67E+03	1.07E+03	2.94E+03	2.85E+03	3.42E+03
	CH ₄	2.57E+03	1.40E+03	2.92E+03	2.83E+03	3.40E+03
	H ₂ S	2.95E+00	2.52E+00	3.58E+00	3.35E+00	4.02E+00
	HCL	2.60E+02	7.06E+01	2.78E+02	2.71E+02	3.25E+02
	Dust	1.03E+05	3.98E+02	1.03E+05	1.01E+05	1.21E+05
水体排放	COD	8.38E+01	2.04E+02	1.35E+02	1.22E+02	1.46E+02
	NH ₃	1.99E+00	4.20E+00	3.04E+00	2.78E+00	3.34E+00

4.3 不同方法的压缩机转子 LCA 结果比较

根据前面确定的生命周期影响评价的计算步骤和方法, 分别计算得到五种生命周期评价方法清单结果的特征化结果, 如表 4.5 所示。

表 4.5 不同 LCA 方法的特征化结果 (kg)

Tab.4.5 The characterization results of different LCA methods (kg)

影响类型	P-LCA	IO-LCA	TH-LCA	IOH-LCA	IH-LCA
PED	4.06E+05	1.66E+05	4.48E+05	4.25E+05	5.10E+05
GWP	1.83E+06	8.07E+05	2.03E+06	1.97E+06	2.36E+06
AP	4.96E+03	2.03E+03	5.47E+03	5.31E+03	6.37E+03
EP	3.63E+03	1.51E+03	4.01E+03	3.89E+03	4.66E+03
POCP	2.38E+01	5.06E+01	3.64E+01	3.43E+01	4.12E+01

从表 4.5 可以看出, IO-LCA 方法得到环境影响远远小于其他四种方法, 这是因为 IO-LCA 方法只能涵盖使用前阶段, 生命周期阶段不完整。除了 IO-LCA 方法以外, 通过 IH-LCA 方法得到的环境影响结果最大, 其次分别为 TH-LCA 和 IOH-LCA, P-LCA 的环境影响最小, 但是这四种方法的环境影响没有明显的差别, 这是因为压缩机转子使用阶段的环境影响占了绝大部分 (约 94%), 而每种 LCA 方法的使用和废弃处置阶段的主要是电力消耗, 这部分数据比较准确, 所以清单结果之间的差别主要来源于使用前阶段。为了清楚的展示不同 LCA 结果之间的差别, 接下来的比较分析中不包括使用阶段, 如表 4.6 所示。通过不同方法得到的压缩机转子使用前阶段的环境影响用图 4.7 表示。从图可以看出, IO-LCA 的环境影响结果明显大于其他方法, 一方面是因为 IO-LCA

方法本身缺点的限制,另一方面是因为本研究采用的投入产出数据部门分类太粗糙和部门环境影响数据精确性不高。

表 4.6 不同方法的环境影响结果比较

Tab.4.6 Comparison of the environmental impacts from different LCA methods

影响类型	P-LCA	IO-LCA	TH-LCA	IOH-LCA	IH-LCA
PED	100%	183%	141%	133%	157%
GWP	100%	176%	143%	137%	153%
AP	100%	189%	125%	111%	139%
EP	100%	171%	127%	119%	135%
POCP	100%	181%	149%	135%	151%

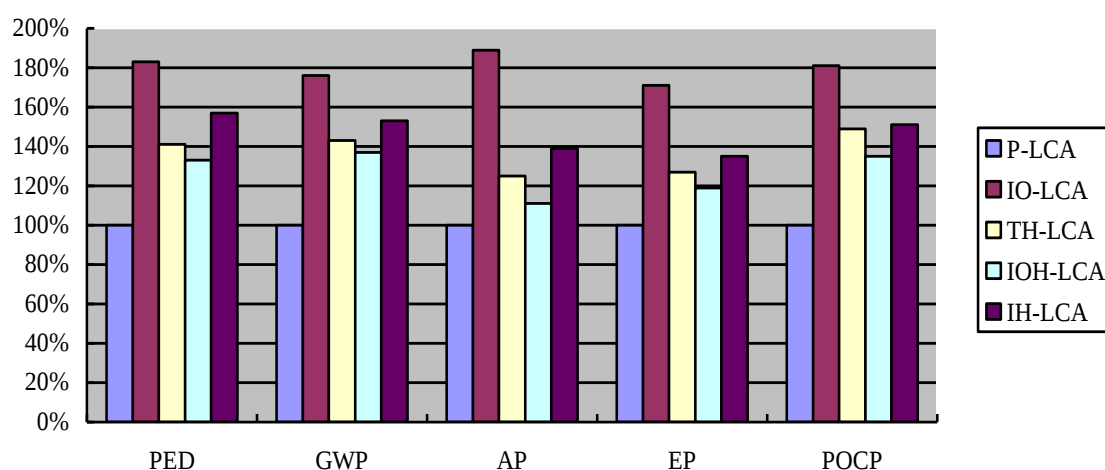


图 4.7 不同方法的使用前阶段环境影响结果比较

Fig.4.7 Comparison of the environmental impacts from different LCA methods

从图中还可以看出 P-LCA 的环境影响结果最小,与三种混合分析方法相比, P-LCA 的结果反映了方法的截断问题(从 11%到 59%),这主要是因为 P-LCA 方法的系统边界不完整,只考虑了原材料的生产、运输、转子制造等几个重要的生命周期阶段,而忽略了生产的上游过程。混合方法利用投入产出分析将上游过程计算在内,既使用基于过程的数据,也使用投入产出数据,所以混合方法的系统边界相对完整。另外,本研究中的大型压缩机转子属于资本密集型产品,容易导致较大的阶段误差^[56]。

由 TH-LCA 方法得到的环境影响结果比 IOH-LCA 方法稍微偏大(从 2%到 14%)。对于 TH-LCA,本文通过使用系统不完整性因子在一定程度上解决了 TH-LCA 的数据重复计算问题,但是可能存在其他因素导致 TH-LCA 和 IOH-LCA 结果的差别,例如 IOH-LCA 方法中的价格转换和经济部门分解。

在混合分析方法中，IH-LCA 的环境影响结果最大。一方面，集成的混合方法具有完整的系统边界，它将过程系统和投入产出系统结合到一个计算框架中，不仅包括了主要的生命周期过程、上游和下游生命过程，而且还包括了各生命周期过程与经济部门之间的相互影响。另一方面，本研究中从 CLCD 数据库中获得大量具体的过程数据补充到了主体数据中。

经过以上对比分析，哪一种方法最好呢？答案是没有哪一种方法可以适合所有情况，但是可以基于研究目标和范围、可使用的资源和时间等选择最适合的方法，本文对生命周期评价方法的选择和使用提出了几条准则，内容如下：

(1) IO-LCA 可以使用较少的资源和时间在相对完整的系统边界的基础上给出一个粗略的生命周期评价结果。然而，因为粗糙的部门分类，它不能反映详细的生产过程的环境表现。因此，它可以作为一个简化的 LCA 模型来评估产品对环境的影响。

(2) 当研究目标是量化详细的生产过程对环境的影响，以便改进生产工艺，基于过程的生命周期评价是最佳选择，因为它能够提供具体的生产过程或阶段的比较准确的环境影响结果。

(3) 当研究目标是进行不同产品或过程的比较性研究，P-LCA 一般就能满足研究要求，混合 LCA 因为一些严格的假设条件，并不一定能得到更充分的结果。

(4) 当研究目标是量化产品整个生命周期的总体环境影响时，混合 LCA 更合适，因为它有更完整的系统边界。因此，接下来的问题是三种混合方法的选取准则是怎么样的。

(5) TH-LCA 是最简单的混合 LCA 方法。但是，必须注意重复计算的问题。可以通过结构路径分析和路径转换方法解决。

(6) 与 IH-LCA 方法相比，IOH-LCA 方法更容易操作些，因为只需要 IO 矩阵而不需要上游和下游矩阵。IOH-LCA 方法中最复杂的部分是分解部门的过程，需要将物质流转换为货币流。因此，比起 IH-LCA 方法，IOH-LCA 是一种更有效更低成本的方法。

(7) IH-LCA 结合了投入产出分析方法和基于过程的方法形成了一个综合的评价模型。它的优点是可以从 LCA 数据库中获得更多的具体的过程数据来补充主要的数据库，并且不需要物质和价格之间的转换。因此，在资源和时间充足，并且足够的数据库可以获得的情况下，IH-LCA 是一个好的选择。

4.4 本章小结

本章首先运用投入产出分析模型计算了压缩机转子生命周期中各个经济部门的能

源消耗和环境排放，然后分别基于三种混合模型进行了压缩机转子的生命周期清单计算和环境影响评价，接下来对比分析了不同方法计算的环境影响结果的差别和原因，得出没有哪一种方法可以适合所有情况，不同的研究目标使用不同的分析方法，并提出了生命周期评价方法的选取准则。

5 生命周期结果解释

5.1 不确定性分析

生命周期评价结果受多种因素的影响，例如研究范围、数据来源、数据缺失、模型方法、以及假设条件等，主要表现就是生命周期清单数据的不确定性，这直接影响了数据质量和评价结果的可信度。因此，系统地评估生命周期清单数据的不确定性是非常必要的，一方面可以发现数据质量问题，有助于进行改进，另一方面有助于提高生命周期评价结果的可信度。本研究中不确定性分析的具体方法是，首先利用数据质量指标法对选取的参数进行不确定性程度评估，然后使用蒙特卡罗模拟法计算不确定性参数对清单结果的影响，最后对评估结果进行综合分析。

表 5.1 数据质量指标及不确定对照表^[57]
Tab.5.1 Data quality index and degree of uncertainty

指标	数据质量等级说明				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
来源可靠性 (U_1)	现场调研的原始数据 (0)	权威的定期更新的数据 (0.025)	一般文献或专著的不定期更新的数据 (0.050)	基于文献或经验的估算和假设 (0.100)	无根据的估算和假设 (0.200)
样本完整性 (U_2)	合适的范围和合适的期间 (0)	稍小的范围和合适的期间 (0.010)	合适的范围和稍短的期间 (0.025)	小范围和合适期间的数据或合适的范围和短期间的数据 (0.050)	未知或小范围和短期间的数据 (0.100)
技术代表性 (U_3)	从被研究产品的企业获得的数据 (0)	技术、过程以及原材料都相同，企业不同 (0.025)	技术相同，过程和原材料有所差别 (0.100)	技术不同，产品相同 (0.200)	用相似的产品的数据代替 (0.350)
年份代表性 (U_4)	不受时间影响或 3 年以内 (0)	6 年以内 (0.015)	10 年以内 (0.050)	15 年以内 (0.100)	数据的年份未知或 15 年以上 (0.200)
地理代表性 (U_5)	来自被研究区域的数据 (0)	包含被研究区域的较大区域范围的平均数据 (0.005)	生产条件和生产力水平相似度较高的区域 (0.010)	生产条件和生产力水平相似度中等的区域 (0.025)	未知区域或生产条件和生产力水平完全不同的区域 (0.050)

5.1.1 参数不确定性程度评估

生命周期评价结果的不确定性主要来源于原始数据，在原始数据的收集过程中，多种因素会影响数据质量，本文考虑了五种比较关键的因素：来源可靠性、样本完整性、技术代表性、年份代表性和地理代表性。每种因素又划分为五个等级，每个等级分配相应的不确定性，如表 5.1 所示。因此，原始数据的不确定性程度 U 可以表示为：

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^5 U_i^2} \quad (5.1)$$

其中， U_i 表示每个因素的不确定度。

5.1.2 蒙特卡洛模拟

在生命周期评价中，不确定性分析一般使用蒙特卡洛模拟法，其他比较常用的方法还有不确定传播法和高斯近似法等。本文采用蒙特卡洛模拟法对压缩机转子生命周期清单的不确定性进行分析。

蒙特卡洛模拟是一种使用一系列随机输入来近似处理问题的方法，又被称为统计试验法，经常用在复杂、非线性或多种不确定参数的模型中。蒙特卡洛模拟属于一种采样方法，输入是按概率分布随机生成来模拟实际采样的过程，因此应该尽量使输入最接近现有的数据，最能代表当前的数据情况。模拟后生成的结果可以表示成直方图、可靠性预测、公差带或置信区间。

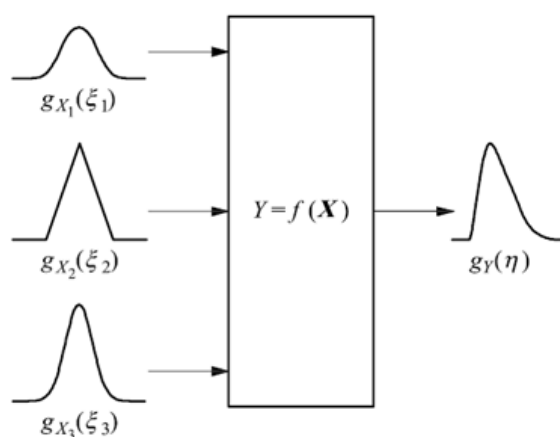


图 5.1 蒙特卡洛模拟法

Fig.5.1 Monte Carlo simulation

图 5.1 表示了蒙特卡洛模拟的基本过程，蒙特卡洛模拟的具体步骤简单，可以在 Excel 中操作，五个步骤如下：

- (1) 定义输入参数的函数模型, $y=f(x_1, x_2, \dots; x_q)$ 。
- (2) 随机生成一组随机输入参数值, $X_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots; x_{iq})$ 。
- (3) 代入模型, 并记录结果 $y_i=f(X_i)$ 。
- (4) 重复步骤 2 和步骤 3, $i=1\sim n$ 。
- (5) 用直方图、汇总统计、置信区间等分析结果。

5.1.3 不确定参数的概率分布函数

在生命周期清单分析中, 不确定参数的概率分布有多种类型, 例如正态分布、三角分布和均匀分布等。在基于过程的压缩机转子生命周期清单分析中, 原材料生产属于压缩机转子生产的上游阶段, 数据取自专业数据库, 与企业调研数据相比存在较大的不确定性。压缩机转子材料组成中, 合金钢的占比最高, 为 83%。本文以合金钢的生产过程中排放的二氧化硫为例, 来分析数据不确定性对生命周期清单结果的影响。另外以合金钢的生产过程中排放的二氧化硫为例对比 P-LCA 和 IO-LCA 方法的不确定性。

合金钢生产的不确定参数值采用正态分布来描述, 经过计算参数值的概率分布函数如表 5.2 所示。

表 5.2 合金钢生产的不确定参数概率分布函数

Tab.5.2 Uncertain parameters and probability distribution function of alloy steel production

LCA 方法	参数	概率分布函数 $N(\mu, \sigma)$
P-LCA	合金钢的投入 X_1 (kg)	$N(4670.0, 46.7)$
	生产单位合金钢 SO_2 排放量 X_2 (kg)	$N(0.01182, 0.000445)$
IO-LCA	“金属冶炼及压延加工业”投入 X_1 (万元)	$N(57.62, 1.71)$
	“金属冶炼及压延加工业”单位价值 SO_2 排放量 X_2 (kg/万元)	$N(3.775, 0.152)$

5.1.4 不确定性分析结果

参数及其概率分布确定以后, 把各个概率分布函数输入到计算模型中, 然后就得到了清单结果的具体概率分析情况。图 5.2 和图 5.3 分别显示了基于 P-LCA 和 IO-LCA 方法计算得到的合金钢生产过程中 SO_2 排放量概率分布, 概率分布的置信区间是 95%, 采样次数是 10000 次。

从图 5.2 可以看出, 通过 P-LCA 方法计算得到的合金钢生产过程中 SO_2 排放量 95% 的置信区间为 (54.13, 56.47), 平均值为 55.3kg。从图 5.3 可以看出, 通过 P-LCA 方法

计算得到的金属冶炼及延压加工业 SO_2 排放量 95%的置信区间为 (237.72, 238.59), 平均值为 217.1kg。

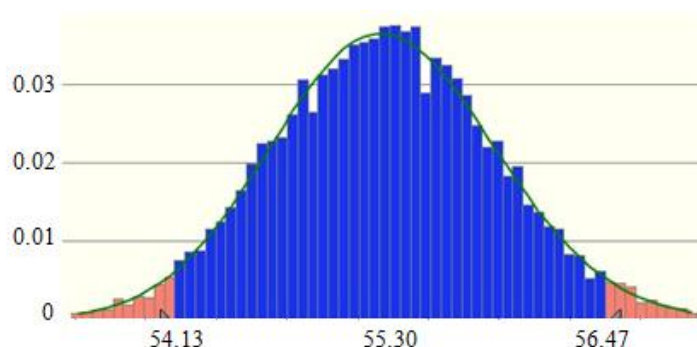


图 5.2 基于 P-LCA 方法的合金钢生产 SO_2 排放量概率分布

Fig.5.2 SO_2 emission probability distribution of alloy steel based on P-LCA

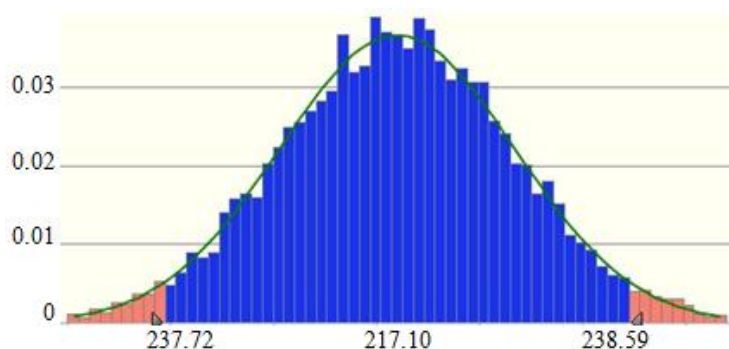


图 5.3 基于 IO-LCA 方法的金属冶炼及压延加工业 SO_2 排放量概率分布

Fig.5.3 SO_2 emission probability distribution of metal smelting industry based on IO-LCA

表 5.3 合金钢生产过程中 SO_2 排放的不确定性

Tab.5.3 The uncertainty of SO_2 emission in alloy steel production

LCA 方法	SO_2 排放(kg)	不确定性	置信区间
P-LCA	55.3	1.22%	[-2.47%, +2.12%]
IO-LCA	217.1	5.00%	[-9.50%, +9.90%]

表 5.3 对比分析了基于 P-LCA 和 IO-LCA 方法计算得到的合金钢生产过程中 SO_2 排放的不确定性。在 95%的置信区间下, P-LCA 方法的清单结果的离散程度较低, 说明参数的不确定性影响不大, 得到的清单结果质量较高。同样在 95%的置信区间下, IO-LCA 方法的清单结果的离散程度明显大于 P-LCA, 这说明了 IO-LCA 清单结果的质量较低。

5.2 敏感性分析

敏感性分析的主要目的是确定各个参数对生命周期评价结果的影响程度，它突出了最重要的一组模型参数，确定数据质量是否需要改进，并加强对结果的解释，是一种研究评价结果鲁棒性的重要工具。敏感性分析的一般公式为：

$$S_{mn} = (\Delta O_m / O_m) / (\Delta I_n / I_n) \quad (5.2)$$

其中， O_m 表示第 m 种环境影响指标结果， I_n 表示第 n 种原始不确定或不一致因子， ΔO_m 和 ΔI_n 分别是 O_m 和 I_n 的变化值， S_{mn} 表示 O_m 对 I_n 的敏感性。

敏感性分析的操作方法通常就是选取一个参数，改变其值，比如-50%，保持其他参数不变，比较结果的变化来判断环境影响结果对这个参数的敏感性。

本研究中采用的大部分数据反映了压缩机转子的实际生产水平，具有很好的代表性，但是存在几项质量较低的数据，有必要对其进行敏感性检查。压缩机转子的运输阶段，假设了压缩机分布在以兰州市为中心的天然气输气管道上，距离沈阳的工厂 2156 公里，然而这个中心距离是不准确的。压缩机转子的使用时间取为 5 年，与压缩机转子的实际使用时间存在一定偏差。废旧压缩机转子的材料回收利用率 90%参考了相关文献，与实际情况存在一定差距。压缩机转子的价格受多种因素影响，也必然存在误差。表 5.4 显示了基于层次混合分析的压缩机转子的综合环境影响结果分别对运输距离、使用时间、回收率和价格的敏感性。

表 5.4 敏感性分析结果

Tab.5.4 The results of sensitivity analysis

参数	$\Delta I_n / I_n$	$\Delta O / O$	S_{mn}
运输距离	-50%	-0.06%	0.0012
使用时间	-50%	-35.7%	0.714
回收率	-50%	+0.798%	-0.016
价格	-50%	-5.26%	0.1052

从表 5.4 可以看出，压缩机转子的综合环境影响结果对使用时间的敏感性最高，说明压缩机转子的使用时间对 LCA 结果的影响很大，因此确保使用时间的准确性非常重要。除了使用时间，环境影响结果对价格的敏感性也较大，说明价格对投入产出分析结果的影响较大。回收率的降低会增加环境影响，使敏感性为负值。环境影响结果对回收率和运输距离的敏感性很低，这是因为这两个参数只能影响各自的生命周期阶段，且废

弃处置阶段和运输阶段的环境影响只占整个环境影响的小部分，因此不会影响整个生命周期环境影响结果的可靠性。

5.3 压缩机转子生命周期环境改善分析

5.3.1 生产阶段环境改善分析

压缩机转子的生产阶段主要表现为大量原材料和能源的消耗，该阶段的环境排放也就来自于原材料和能源的生产过程。因此减少生产阶段的环境影响就需要减少原材料和能源的消耗，提出以下几条改善措施：

（1）减少原材料消耗。压缩机转子生产过程中的材料利用率较低，尤其叶轮的加工过程，仅为 12%，可以采取精密锻造减少后续的机械加工过程，还可以采用工艺优化、切屑回收利用等措施节省材料。

（2）优化管理制度，提高生产率和能源利用率。压缩机转子生产过程中的电、油、水以及切削液等的消耗会受生产节奏和管理制度的影响，所以改进管理制度、提高生产率能够有效减少资源和能源消耗。

（3）改善电力结构，提高清洁能源的比例。压缩机转子生产阶段的电力结构取决于当地的电力结构情况，现阶段电力主要来源于火力发电，在未来应该多发展风电、核电、水电等清洁能源，这是一个长期的改善过程。

（4）在压缩机转子设计阶段就引入生命周期设计的方法，优化产品结构和加工工艺，从而降低零部件制造过程中的能耗，从源头减少资源、能源消耗和环境排放。

5.3.2 运输和使用阶段环境改善分析

压缩机转子运输阶段的环境影响主要在于汽车燃油的消耗和汽车尾气的排放。因此减少运输阶段的环境影响关键在于提高汽车燃油效率和减少汽车尾气排放，这里总结了以下几条主要的改善方法：

（1）提高燃油标准或使用燃油替代品。例如减少汽油中的含铅量、增加燃气汽车的数量。

（2）依靠技术进步提升发动机的性能，从而提高燃油效率、减少耗油量。

（3）车辆定时保养和维修，及时发现问题。例如检查阻气门和空气管道，经常更换机油等。

（4）采用先进的汽车尾气处理技术。

压缩机转子使用阶段的环境影响主要表现为电能的消耗，所以需要从节能的角度寻找措施。首要是提高压缩机的工作效率。其次是优化电力结构，降低煤电的使用比例。

5.3.3 废弃处理阶段环境改善分析

废旧产品的处理是关于可持续发展的一个重要问题。目前关于废旧产品的处理通常有三种方案：整体填埋、回收利用、再制造。本节重点分析废旧压缩机转子的三种不同处理方案对整个生命周期的环境影响。

由于产品使用阶段的环境影响与不同的废弃处理方案之间的关系不大，这里的环境影响结果不包括使用阶段。在第三章我们已经得到压缩机转子采用回收利用的环境影响结果，只需再计算整体填埋和再制造的环境影响结果。表 5.5 显示了压缩机转子分别采用三种废弃处理方案得到的五种环境影响指标的标准化结果。

表 5.5 采用不同废弃处理方案的环境影响标准化结果
Tab.5.5 The environmental impacts of using different waste treatment schemes

废弃处理方案	PED	GWP	AP	EP	POCP
整体填埋	112.56	44.86	28.76	12.56	13.24
回收利用	105.1	42.2	27.1	11.5	8.95
再制造	32.12	13.23	8.32	3.79	2.48

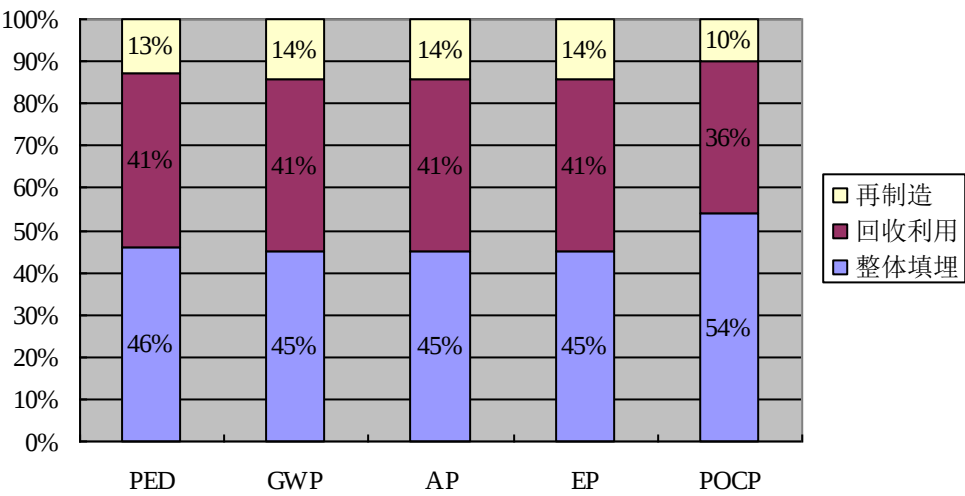


图 5.4 压缩机转子采用不同废弃处理方案环境影响评价结果比较

Fig.5.4 Comparison of environmental impacts of using different waste treatment schemes

图 5.4 对比表示了压缩机转子不同废弃处理方案环境影响，从图中可以看出，在五个环境影响类型上再制造均有显著优势。整体填埋的过程对环境造成的影响并不大，但是废旧压缩机转子具有很多有用的资源，直接进行填埋是对资源的浪费，因此对废旧压

缩机转子的再生利用可以大大节约能源和材料。与整体填埋相比，再制造在节约能源、资源、减少环境排放的优势较明显，初次能源消耗（PED）、全球变暖潜值（GWP），酸化潜值（AP），水体富营养化潜值（EP）和光化学烟雾潜值（POCP）分别减少了 77.42%、70.46%、71.00%、69.74%和 81.00%。从图中还可以看出，与整体填埋相比，回收利用减少环境影响的优势不是很明显，可以通过增加回收率进一步减少环境影响。

综上所述，与回收利用和整体填埋相比，再制造通过减少原材料消耗和制造过程环境影响大大降低，所以再制造是最好的废弃处理方案。为了有效的保护环境、降低资源消耗、节约能源、减少排放，在再制造技术成熟、国家各项政策允许的前提下，压缩机制造企业应该大力推行再制造。

5.4 本章小结

本章的主要内容是生命周期结果解释，首先进行了数据质量评估，包括不确定性分析和敏感性分析。然后根据前面获得的详细环境影响信息，分别针对压缩机转子的生产阶段、运输和使用阶段以及废弃处理阶段进行了环境改进分析。生产阶段主要是减少原材料和能源的消耗，运输阶段的重点是减少汽车尾气排放。使用阶段的环境影响主要表现为电力消耗，主要措施是提高压缩机效率和优化电力结构。对于废弃处理阶段，对比分析了整体填埋、回收利用和再制造三种方案的环境影响，与整体填埋相比，再制造在 PED、GWP、AP、EP、POCP 分别减少 33%、31%、31%、31%、44%。

6 生命周期评价原型系统设计

6.1 LCA 数据库设计

6.1.1 LCA 数据库模型分析

数据库的设计过程一般分为两部分，首先根据实体建立数据模型，然后将数据模型转变成由表组成的数据库结构。本研究在总结国内外数据库设计的基础上，根据生命周期评价的框架，搭建了 LCA 数据库的整体结构模型，如图 6.1 所示。

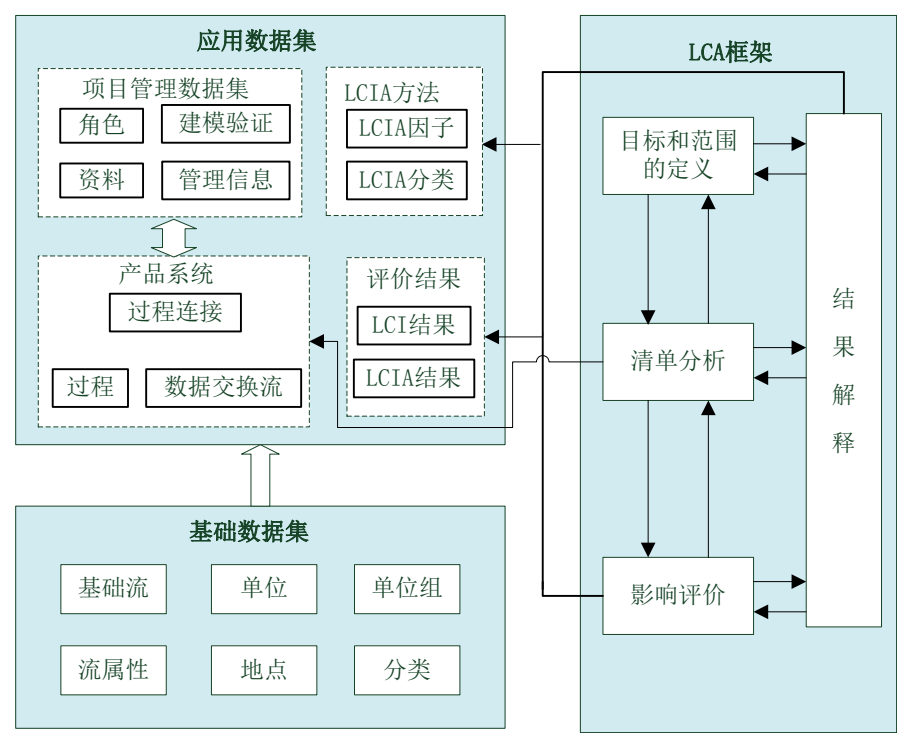


图 6.1 LCA 数据库整体结构

Fig.6.1 The overall structure of LCA database

从图 6.1 可以看出，在 LCA 框架的基础上，数据库分为两大模块。底层模块是由基础流、流信息、单位、单位组、地点、分类等实体组成的基础数据集，这些数据不包括具体的数值，在所有的 LCA 项目中基本保持不变，具有通用性。上层模块是由产品系统、项目管理数据集、LCIA 方法和评价结果四个子模块组成的应用数据集，存放的是具体的 LCA 项目和 LCIA 方法等数据，是 LCA 数据库的核心部分。产品系统数据由单

6.1.2 LCA 数据库设计实现

基础数据集的数据库结构关系如图 6.2 所示，图中详细说明了基础数据集中各表的字段名称、数据类型和结构关系。

图 6.2 基础数据集结构关系图

基础流表是基础数据库的核心部分。基础流可以表示物质、能量、产品或服务实体，基础流表中包含名称、分类、备注、流类别、基础设施流、CAS 码、公式、参考流属性、地点等信息，名称用来表示基础流的名称，分类表示基础流的环境影响区域、资源类型等信息，备注是基础流的一些附加说明，流类别用来说明基础流是基本流、产品

流或废物流，基础设施流表示基础流是否与基础设施建设相关，CAS 码是某种物质的唯一数字识别号码，公式表示物质的化学式，如二氧化碳的化学式为“CO₂”，参考流属性表示基础流的属性信息，地点表示数据收集的地理位置。

(2) 产品系统数据集

产品系统数据集的数据库结构关系如图 6.3 所示，图中清楚地显示了每张表的详细设计。

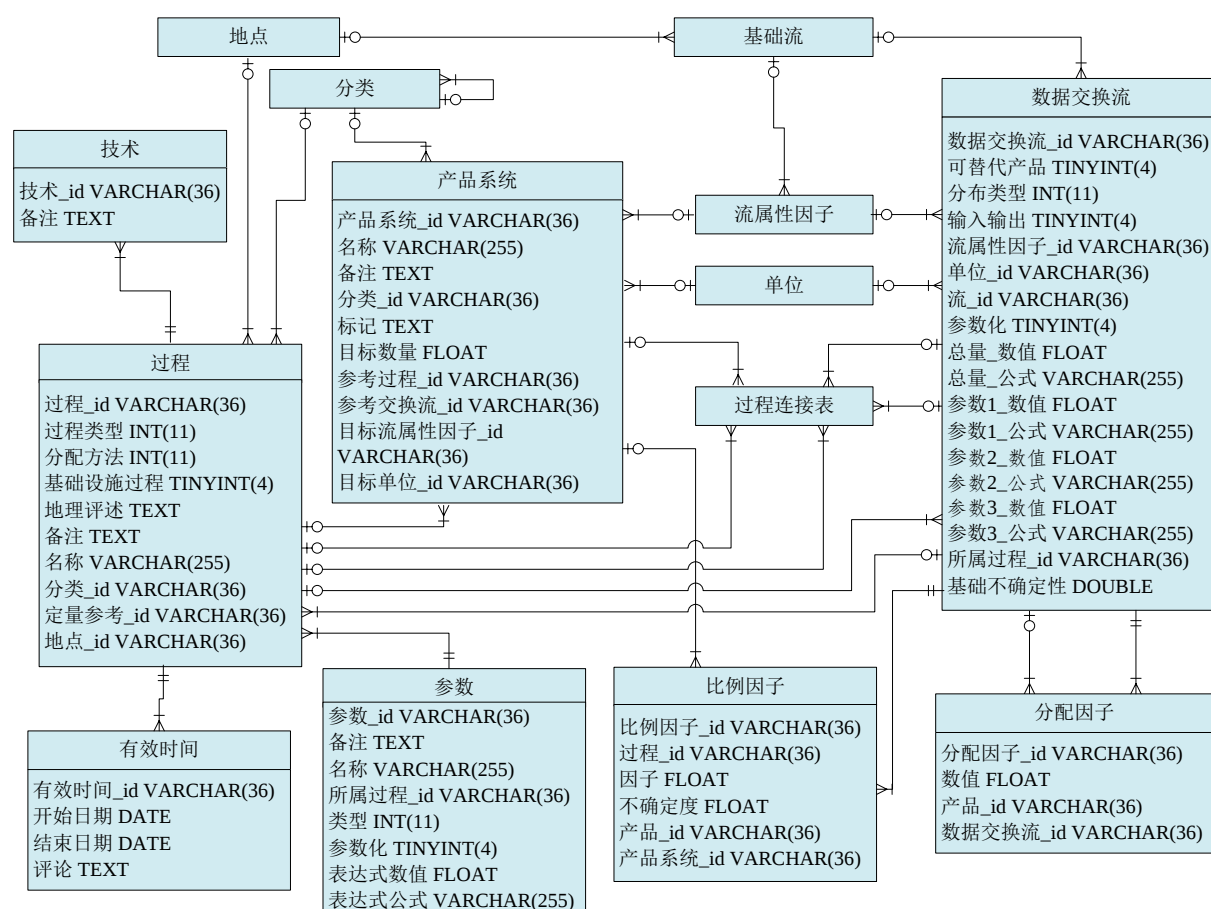


图 6.3 产品系统数据集结构关系图

Fig.6.3 Database diagram of the product system dataset

产品系统数据集是生命周期评价数据库中最重要的一部分，是进行 LCA 的直接数据。产品系统数据集由过程表、数据交换流表、产品系统表、过程连接表、分配因子表、比例因子表、参数表、有效时间表、技术表等组成。产品系统数据的建立需要基础数据集的支持，因此产品系统数据与基础数据集紧密连接，基础数据表前面已经详细介

绍过了，这里不再重复。过程表用来记录产品生命周期各过程的详细数据，包括过程类型、分配方法、分类、地点等信息。技术表存放过程对应的技术细节，有效时间表保存过程对应技术的有效时间，参数表记录与过程相关的参数。数据交换流表存放具体数值，还包括可替代产品、分布类型、输入输出等信息。产品系统表保存的数据包括产品系统的名称、参考过程、参考交换流、目标流属性因子等信息。比例因子表主要存放各个过程占产品系统功能单位的比例。过程连接表用来表示产品系统每个过程之间的层次关系。

(3) 项目管理数据集

项目管理数据集的数据库具体设计如图 6.4 所示，包括各表的字段名称、数据类型和结构关系。

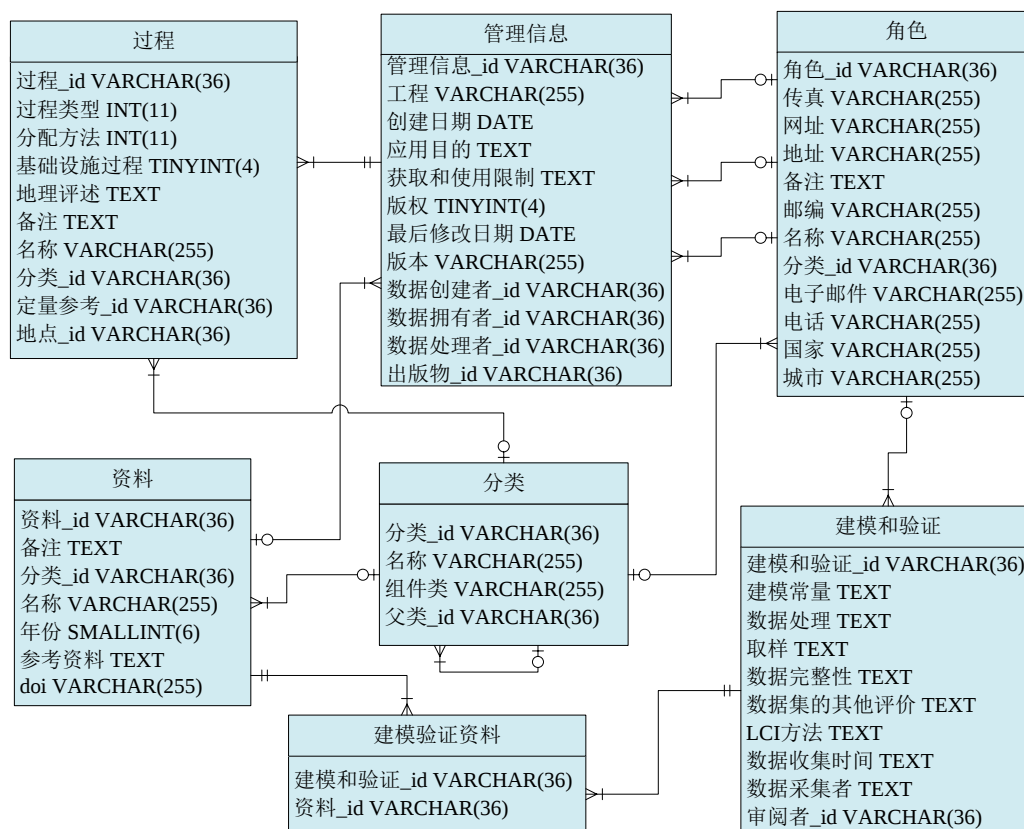


图 6.4 项目管理数据集结构关系图

Fig.6.4 Database diagram of the project administrative dataset

项目管理数据集包括角色表、管理信息表、建模和验证表、资料表等。角色表用来存储相关人员和单位的详细信息。资料表保存相关参考资料的名称、出版年份、检索号

等信息。管理信息包括工程名称、创建日期、应用目的、版权、数据创建者等信息。建模和验证用来描述建模过程的参考常量、数据的处理方法、取样情况、数据取舍准则、数据收集时间、采集者和审阅者等信息。

(4) LCIA 方法数据集

LCIA 方法数据集的数据库详细设计如图 6.5 所示。

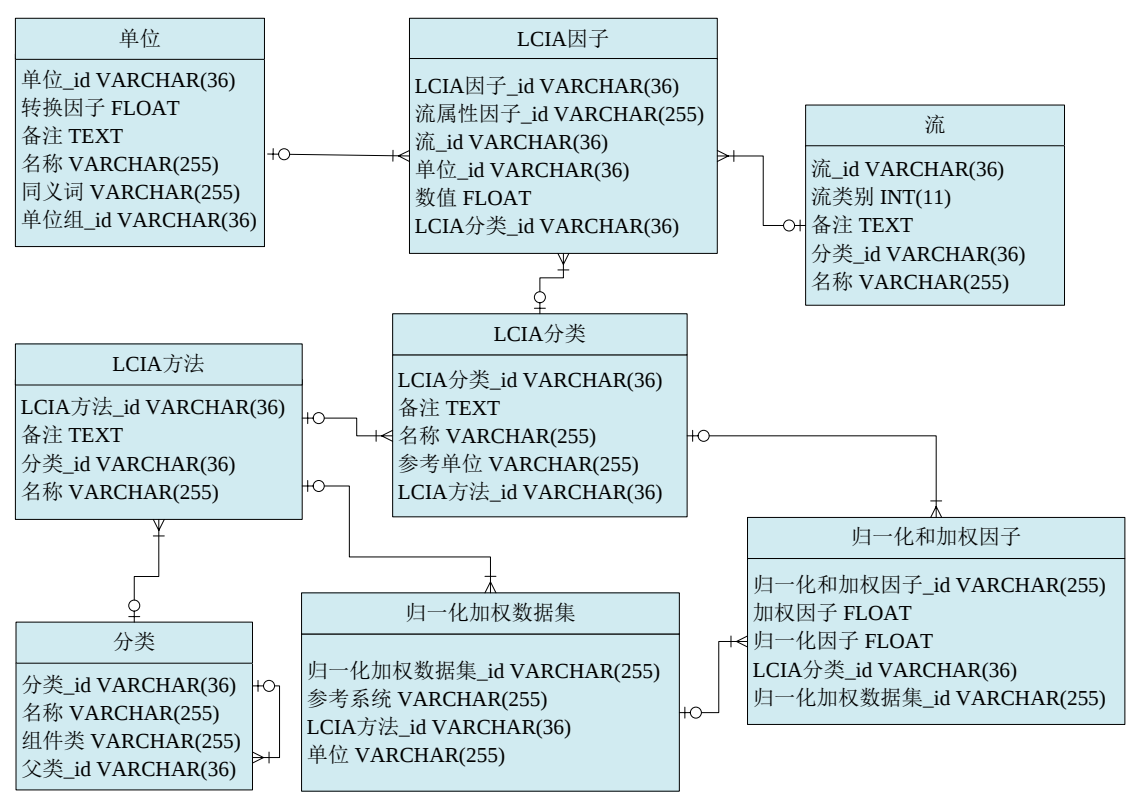


图 6.5 LCIA 方法数据集结构关系图

Fig.6.5 Database diagram of the LCIA method dataset

LCIA 方法表存储 LCIA 方法的名称、分类以及备注信息。LCIA 分类表用来存储 LCIA 分类的名称、参考单位及备注信息。LCIA 因子表保存基础流对各 LCIA 类型的特征化因子，包括流属性因子、流名称、数值、单位、LCIA 分类。归一化加权数据集说明了参考系统、LCIA 方法及相应的单位。归一化因子和加权因子保存在归一化和加权因子表中。

(5) 评价结果数据集

评价结果数据集的数据库结构关系如图 6.6 所示，图中详细说明了评价结果数据集

中每张表的字段名称、数据类型和结构关系。

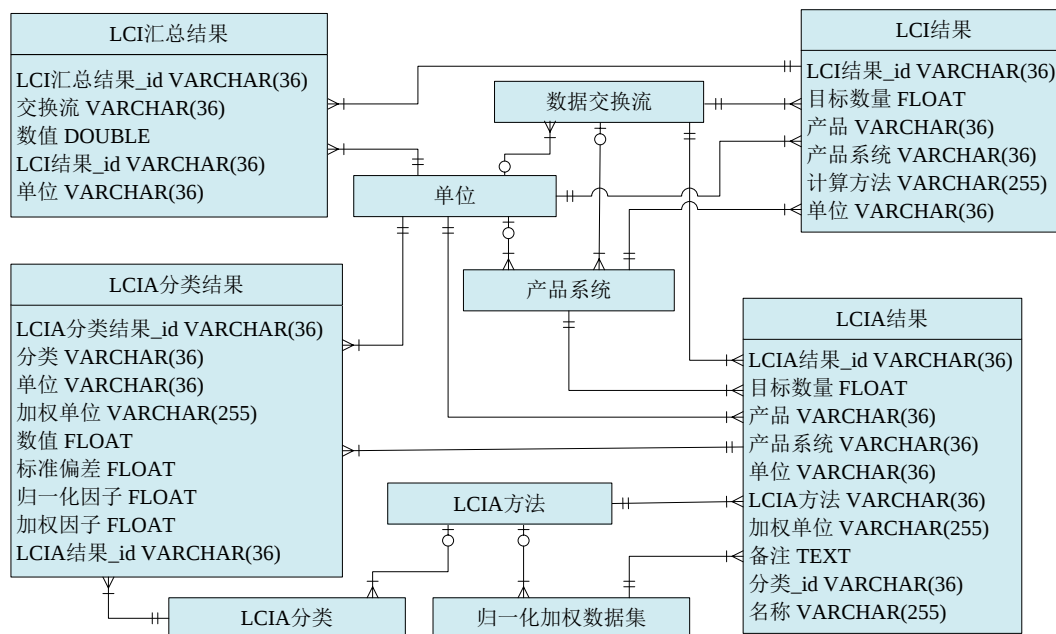


Fig.6.6 Database diagram of the impact result dataset

生命周期评价结果分为 LCI 结果和 LCIA 结果，LCI 结果主要用 LCI 结果表和 LCI 汇总结果表存放，LCIA 结果主要用 LCIA 结果表和 LCIA 分类结果表存放。LCI 结果表存放目标数量、产品、产品系统、计算方法及单位等信息，LCI 汇总结果表存放汇总的交换流名称、数值、单位等信息。LCIA 结果表存放影响评价的相关信息，主要内容包括产品、产品系统、LCIA 方法、分类、名称、单位等，LCIA 分类结果表存放 LCIA 结果相应的分类、数值、归一化因子、加权因子、单位信息。

6.2 LCA 软件设计

6.2.1 开发环境

openLCA 是一个开放源代码的生命周期评价和可持续性评价软件，由德国 GreenDelta 公司开发，是一种快速、可靠和模块化的应用程序框架。作为一个开源软件，openLCA 可以免费使用，不需要许可证，用户还可以根据需要对源代码进行改进，添加自己的应用模块。openLCA 是基于 Eclipse 开发平台的富客户端（RCP）应用程序，使用的是 Java 语言。因此，本研究以 Java 为开发语言，Eclipse 为开发工具，基于 openLCA 开源软件，综合应用 HTML、JavaScript、maven、jdk 等技术，进行 LCA 软件的开发。

6.2.2 关系型数据库

本研究采用关系型数据库技术，常用的关系型数据库平台有 Oracle、SQL Server、MySQL 等^[58]。Oracle 属于大型商业数据库管理系统，具有高稳定性、高生产率、高性能等优势，支持高并发和大访问量，广泛应用于大型商业网络系统，但是 Oracle 的价格比较昂贵。SQL Server 是微软公司开发的产品，具有操作简便、可伸缩性好等优点，但是只能在 Windows 上运行。MySQL 数据库管理系统支持所有操作系统，性能出色，可移植性高，良好的运行效率，安装简单小巧，广泛应用于中小型网站，此外 MySQL 代码开源，可以免费使用^[59]。由于本文建立的 LCA 数据库规模不是很大，要求支持多种操作系统，因此选用 MySQL 作为开发 LCA 数据库的平台。

6.2.3 系统总体设计

生命周期评价软件工具的目的是帮助用户完成产品生命周期评价，实现产品环境影响评估，帮助改进设计等^[19]。本系统基于 openLCA 软件，以 LCA 数据库为基础，结合 P-LCA 方法和 EIO-LCA 方法，设计了生命周期评价系统的总体框架，如图 6.7 所示。LCA 系统包括支撑层、模型方法层、业务层和应用层。支撑层主要包括操作系统、网络、数据库，模型方法层分为基于 openLCA 的 P-LCA 模型和 IO-LCA 模型，业务层包括基于过程的 LCA 模块、基于经济的 LCA 模块、环境影响评价模块和结果解释模块。

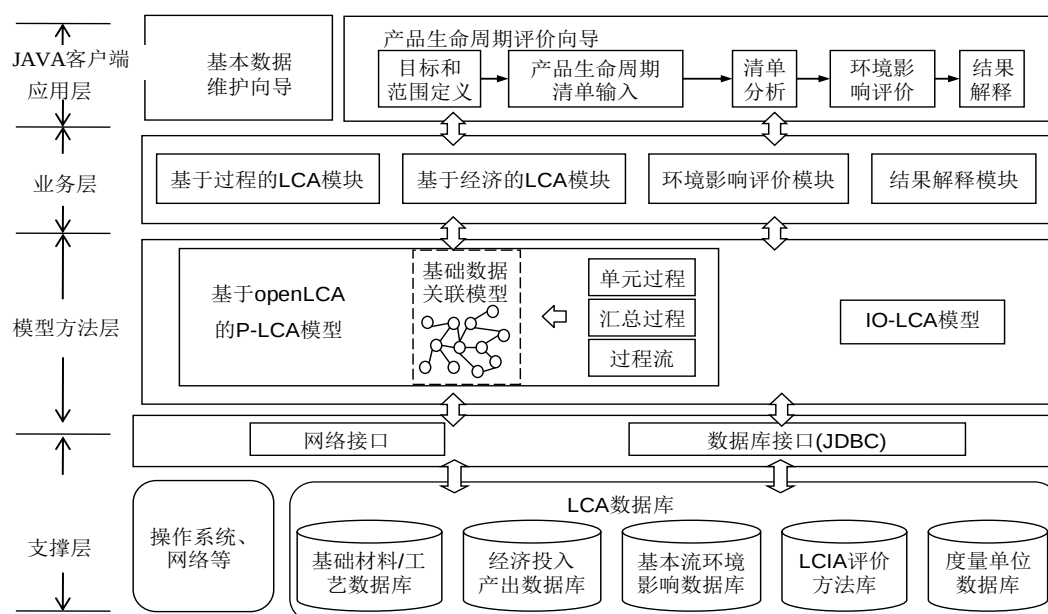


图 6.7 LCA 系统总体框架

Fig.6.7 The whole framework of LCA system

6.2.4 系统功能的实现

确定了系统的开发环境和总体结构之后,就可以进行系统的详细设计,这部分内容属于程序实现阶段,在这里不做太多的论述。系统的主界面如图 6.8 所示,包含标题栏、菜单栏、工具栏和导航栏。



图 6.8 系统主界面

Fig.6.8 The main interface of system

本系统的主要功能模块分为基于过程的生命周期评价和基于投入产出的生命周期评价,系统操作流程遵循 ISO14040 标准规定的生命周期评价的技术框架,下面以压缩机转子的生产为例分别简单介绍本系统的两种主要功能:

(1) 基于过程的生命周期评价

在设计 LCA 系统软件中,将压缩机制造中原材料使用、相关工艺能耗数据录入到系统中,在系统中按照过程生命周期评价的建模流程,定义相应的评价目标、功能单元,编辑压缩机转子生命周期流程(图 6.9),就可以得到压缩机转子生命周期清单结果和影响评价结果,结果的表示分为综合信息、清单汇总(图 6.10)、标准化、归一化及加权、过程贡献、流贡献(图 6.11)、位置、组。

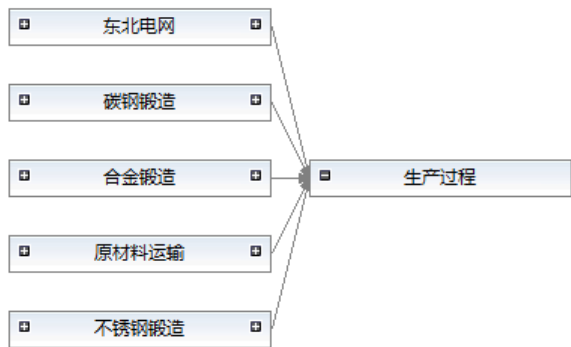


图 6.9 压缩机转子生命周期在软件中建模

Fig.6.9 Modeling compressor rotor life cycle in software

流	类别	子类别	单位	数量
natural gas; 44.1 MJ/kg	resource	in ground	MJ	7.49107...
Coal, hard, 30.7 MJ per kg, in ground	resource	in ground	kg	1.21941...
crude oil; 42.3 MJ/kg	resource	in ground	MJ	9.22914...

流	类别	子类别	单位	数量
Carbon monoxide	air	high population de...	kg	152.052...
Ammonia	air	high population de...	kg	1.57397
Sulfur dioxide	air	high population de...	kg	595.381...
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	air	high population de...	kg	1.77221...
Carbon dioxide	air	high population de...	kg	1.96883...

图 6.10 基于 P-LCA 的压缩机转子生产清单结果

Fig.6.10 The inventory results of compressor rotor manufacturing based on P-LCA

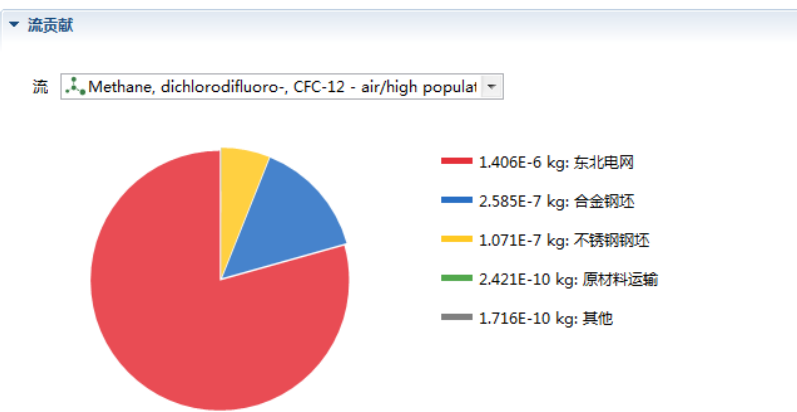


图 6.11 基于 P-LCA 的压缩机转子生产综合信息

Fig.6.11 The general information of compressor rotor manufacturing based on P-LCA

(2) 基于投入产出的生命周期评价

在软件系统中基于投入产出分析进行压缩机转子的生命周期评价时,首先选择产品的经济部门,然后设定产品的价格,最后进行计算得到清单结果和影响评价结果,如图 6.12 所示。

EIO分析方法

▼ 选择部门

16:通用专用设备制造业

1:农林牧渔业
2:煤炭开采和洗选业
3:石油和天然气开采业
4:金属矿采选业
5:非金属矿及其他矿采选业

价格 100 万元

▼ 结果

清单物质	数量	单位
能源消耗CE	162763.95689499524	kg
CO2	431108.9538033445	kg
CH4	1222.1885117885766	kg

影响类型	特征化结果	标准化结果	参考单位
初次能源消耗PED	162763.95689499524	196.57482716786865	kg CE-Eq
全球变暖GWP	807939.9064779091	92.86665591700104	kg CO2-Eq
酸化AP	1958.7970571524347	54.41102936534541	kg SO2-Eq
生态毒性潜力EPD	1484.0634004534033	22.026401026667705	kg NO2-Eq
综合环境影响		2729.14672470946	

图 6.12 基于 IO-LCA 的压缩机转子生产清单结果

Fig.6.12 The inventory results of compressor rotor manufacturing based on IO-LCA

6.3 本章小结

本章设计和开发了生命周期评价原型软件系统。首先以 MySQL 作为数据库平台,建立了 LCA 数据库,实现了部分中国产品数据清单和环境影响权重的导入,然后在 openLCA 软件框架的基础上,采用 Eclipse 作为开发工具,设计了具有 P-LCA 和 IO-LCA 功能的软件系统。

结 论

面对资源趋紧和环境恶化的严峻形势，发展绿色设计和清洁生产是必然选择。生命周期评价作为一种评估产品、工艺过程或活动潜在环境影响的有力工具，已经成为国内外研究的热点。本文选取国产大型长输管线离心压缩机 PCL803 的转子部件为研究对象，进行了生命周期评价方法的研究及应用，得到以下主要结论和研究成果：

(1) 详细分析了当前生命周期评价的主要方法，包括基于过程的生命周期评价，基于投入产出的生命周期评价，混合生命周期评价，并针对混合生命周期评价方法中的数据重复问题进行了改进。

(2) 基于过程的生命周期评价方法对压缩机转子的各生命周期阶段进行了详细的清单分析以及环境影响评价，使用阶段的综合环境影响占整个生命周期的 75%，叶轮生产的综合环境影响占整个生产阶段的 89.4%，铣削工艺的综合环境影响占叶轮生产的 86.7%。

(3) 分别基于投入产出分析和三种混合分析模型进行了压缩机转子的生命周期清单分析和环境影响评价，对比分析了不同模型环境影响结果的差别和原因，提出了通用的生命周期评价方法的选取准则。集成混合模型充分考虑了过程系统和国民经济的上、下游部门之间的双向关系，对数据收集要求最高，在三种混合分析方法计算的结果中最大，与 P-LCA、TH-LCA 和 IOH-LCA 相比分别增大 57%、16%、24%。

(4) 由蒙特卡罗不确定性分析的结果可以看出，与投入产出部门数据相比，基于过程的数据 LCA 结果更加准确，可信度更高。压缩机转子的使用时间和价格对 LCA 结果的敏感性很大，需要在今后的调研中进一步完善研究。根据清单分析结果和环境影响评价结果，针对压缩机转子的生产阶段、使用和运输阶段的环境问题提出了改善建议，生产阶段主要是减少原材料和能源的消耗，运输阶段的重点是减少汽车尾气排放。对比分析了整体填埋、回收利用和再制造三种废弃处理方案对压缩机转子整个生命周期的环境影响，与整体填埋相比，再制造在 PED、GWP、AP、EP、POCP 分别减少 33%、31%、31%、31%、44%。

(5) 设计和开发了生命周期评价原型软件系统。首先以 MySQL 作为数据库平台，建立了 LCA 基础数据库，实现了部分中国产品数据清单和环境影响权重的导入，然后在 openLCA 软件框架的基础上，采用 Eclipse 作为开发工具，设计了具有 P-LCA 和 IO-LCA 功能的软件系统。

虽然本研究取得了以上一些成果，但是时间和个人水平有限，存在几个需要进一步完善和改进的地方：

（1）数据收集过程中，原材料生产数据取自专业的 LCA 数据库，反映的是全国平均水平，与压缩机转子原材料实际生产水平存在一定差异，在今后的研究中需要进一步收集上游生产数据，扩大研究范围。

（2）投入产出分析中，由于国家投入产出表和环境统计年鉴的限制，缺乏部分数据，部门分类粗糙，影响了结果的准确度，今后随着国家统计数据的积累，这方面的研究工作应该进一步加强。

（3）生命周期评价软件系统方面，LCA 数据库中的清单数据还需要继续补充，评价软件中的混合生命周期评价功能还不完善，后续应该进一步开发混合生命周期评价的功能模块。

参 考 文 献

- [1] 陈邵峰, 刘扬, 李颖明. 中国资源环境问题的发展态势及其演变阶段分析[J]. 科技促进发展, 2014, 10(3): 11-19.
- [2] West J, Schandl H, Heyenga S, et al. Resource Efficiency: Economics and Outlook for China [R]. Bangkok, Thailand: UNEP, 2013.
- [3] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2014 中国可持续发展战略报告-创建生态文明的制度体系[R]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] 王安建. 认识资源消费规律, 把握国家资源需求[J/OL]. 科学新闻, 2012.
<http://www.sciencenet.cn/skhtmlnews/2012/2/1680.html>
- [5] 中国科学院可持续发展战略研究组. 2013 中国可持续发展战略报告-探索低碳发展之路[R]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [6] Xu C, Shi W, Hong J, et al. Life cycle assessment of food waste-based biogas generation [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 49:169-177.
- [7] International Standards Organization. ISO 14040 Environmental management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework [S]. Geneva: Switzerland, 1997.
- [8] 国家发展和改革委员会.“十一五”十大重点节能工程实施意见[EB/OL]. 2006-07-25.
http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/tz2006/t20060802_78934.htm.
- [9] 杨建新, 王如松. 生命周期评价的回顾与展望[J]. 环境科学进展, 1998, 6(2): 21-27.
- [10] Suh S, Huppes G. Methods for life cycle inventory of a product [J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(7): 687-697.
- [11] Jiang Q H, Li T, Liu Z C, et al. Life cycle assessment of an engine with input-output based hybrid analysis method [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 78:131-138.
- [12] Crawford R H, Treloar G J, Fuller R J, Bazilian M. Life-cycle energy analysis of building integrated photovoltaic systems (BiPVs) with heat recovery unit [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(6): 559-575.
- [13] Baral A, Bakshi B R. Emergy analysis using US economic input-output models with applications to life cycles of gasoline and corn ethanol [J]. Ecological Modelling, 2010, 221(15):1807-1818.
- [14] Rowley H V, Lundie S, Peters G M. A hybrid life cycle assessment model for comparison with conventional methodologies in Australia [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14:508-516.
- [15] Suh S, Lenzen M, Treloar G J, et al. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(3): 657-664.
- [16] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. 科技进步与对策, 2013, 30 (6): 155-160.
- [17] SimaPro. SimaPro LCA software [EB/OL]. [2017-04-14]. <http://www.pre.nl/simapro.html>.
- [18] Gabi. GaBi — Life Cycle Assessment (LCE/LCA) Software System for Economic, Ecological and Technical [EB/OL]. [2017-04-14]. <http://www.gabi-software.com/>.

- [19] 陈孝旭.机电产品生命周期评价建模研究及支持工具开发[D].济南: 山东大学, 2011.
- [20] Team.TEAM — Tool for Environmental Analysis and Management [EB/OL]. [2017-04-14].
https://www.ecobilan.com/uk_team.php.
- [21] Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, et al. Recent developments in Life Cycle Assessment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91: 1-21.
- [22] Tukker A, Bulavskaya T, Giljum S, et al. The global resource footprint of nations. Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption [J/OL]. 2015.
http://www.truthstudio.com/content/CREEA_Global_Resource_Footprint_of_Nations.pdf.
- [23] Lenzen M, Kanemoto K, Moran D, et al. Mapping the structure of the world economy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15): 8374–8381.
- [24] 刘复璐,王洪涛,陈建,等.中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J].*环境科学学报*, 2010, 30 (10): 2136- 2144.
- [25] Gong X Z, Nie Z R, Wang Z H, et al. Research and development of Chinese LCA database and LCA Software [J]. *Rare Metal*, 2006, 25(s2):101-104.
- [26] Xu J C, Hao W C, Kou X L, et al. Research and development of the object-oriented life cycle assessment database [J]. *Materials and Design*, 2001, 22: 101-105.
- [27] 江志刚, 张华, 曹华军, 等. 面向绿色制造的工艺规划数据库系统研究[J].*机械*, 2005, 32(5):42-45.
- [28] Zanghelini G M, Cherubini E, Orsi P, et al. Waste management life cycle assessment: the case of a reciprocating air compressor in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 70: 164-174.
- [29] Biswas W, Rosano M. A life cycle greenhouse gas assessment of remanufactured refrigeration and air conditioning compressors [J]. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 2011, 2: 222-236.
- [30] Shi J L, Li T, Zhang H C, et al. Energy consummation and environmental emissions assessment of a refrigeration compressor based on life cycle assessment methodology [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20:947-956.
- [31] Benton K, Yang X F, Wang Z C. Life cycle energy assessment of a standby diesel generator set [J]. *Journal of Cleaner Production* 2017, 149: 265-274.
- [32] Wen B, Jin Q, Huang H, et al. Life cycle assessment of quayside crane: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 148: 1-11.
- [33] 曹华军, 李洪丞, 宋胜利, 等. 基于生命周期评价的机床生命周期碳排放评估方法及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(11):2432-2437.
- [34] 张建普.电冰箱全生命周期环境影响评价研究[D].上海: 上海交通大学, 2010.
- [35] Cooney G, Hawkins R T, Marriott J. Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(5): 689–699.
- [36] Spivak A. A Theoretical model for life cycle inventory analysis using a disaggregated hybrid methodology [D]. The University of Toledo, 2011.
- [37] Lenzen M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(4):127-148.
- [38] Lee M B, White G. Embodied energy LCA assessment of replace / refurbish options for traditional buildings [R]: Crichton Carbon Centre and Small World Consulting for Historic Scotland.

- [39] Reimann K, Finkbeiner M, Horvath A, et al. Evaluation of environmental life cycle approaches for policy and decision making support in micro and macro level applications [R]. Italy, 2010.
- [40] Suh S. Functions, commodities and environmental impacts in an ecological-economic model [J]. Ecological Economics, 2004, 48:451-467.
- [41] Nielsen A M, Weidema B P. Input/Output analysis - Shortcuts to life cycle data? [R]. Danish: Danish Environmental Protection Agency, 2001.
- [42] Moriguchi Y, Kondo Y, Shimizu H. Analyzing the life cycle impact of cars: the case of CO₂ [J]. Industry & Environment, 1993, 16(1):42-45.
- [43] Leontief W. The structure of the American economy, 1919-1939[M]. New York: Oxford University Press, 1951.
- [44] Bullard C W, Penner P S, Pilati D A. Net energy analysis-handbook for combining process and input-output analysis[J]. Resources & Energy, 1976, 1(3):267-313.
- [45] Treloar G J. Extracting embodied energy paths from input-output tables: towards an input-output-based hybrid energy analysis method [J]. Economic Systems Research, 1997, 9(4):375-91.
- [46] International Standards Organization. ISO 14042 Life Cycle Assessment-Impact Assessment [S]. Geneva: Switzerland, 1998.
- [47] Dreyer L C, Niemann A L, Hauschild M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and eco-indicator 99[J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(4): 191-200.
- [48] 国家标准委员会. GB/T 2589-2008 计算生产能耗的一般原则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [49] IPCC. Climate Change Synthesis Report[R]. IPCC Fourth Assessment Report, 2007.
http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar4/syr/ar4_syr.Pdf.
- [50] Laurent A, Olsen S I, Hauschild M Z. Normalization in EDIP97 and EDIP2003: updated European inventory for 2004 and guidance towards a consistent use in practice [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16: 401-409.
- [51] Howard N, Edward S, Anderson J. Methodology for environmental profiles of construction materials, components and buildings[M]. BRE, Watford, 2007.
http://www.bre.co.uk/filelibrary/greenguide/PDF/Environmental_Profiles_Methodology_-_Draft.pdf
- [52] 国家统计局国民经济核算司. 2012 年中国投入产出表[G]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [53] 国家统计局. 中国统计年鉴 2012 [G]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012
- [54] 中国环境年鉴编辑委员会. 中国能源统计年鉴 2012 [G]. 北京: 中国环境年鉴, 2012.
- [55] Chen G Q, Zhang B. Greenhouse gas emissions in China 2007: Inventory and input-output analysis [J]. Energy Policy, 2010, 38:6180-6193.
- [56] Mattila T J, Pakarinen S, Sokka L. Quantifying the total environmental impacts of an industrial symbiosis - a comparison of process, hybrid and input-output life cycle assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44:4309-4314.
- [57] 黄娜, 王洪涛, 范辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的 LCA 数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529-1536.

[58] 孙梦澜. 浅谈几种比较流行的 Web 数据库[J]. 华章, 2011, 24: 276.

[59] 聂凯, 曹曼曼. MySQL 数据库的访问方法浅析[J]. 科技资讯, 2010, 9: 21.

攻读硕士学位期间发表学术论文情况

- 1 **Liang Wang**, Tao Li. Life cycle assessment of a compressor rotor with a hybrid analysis model, *Advances in Engineering Research*, 2017, 112: 240-247. (本硕士学位论文第四章)
- 2 Wang Gao, Tao Li, Shi-tong Peng, **Liang Wang**, Hong-chao Zhang. Optimal timing and recycling operation model for electro-mechanical products active remanufacturing, *Frontiers of Engineering Management*, 2016, 3(2):115-122. (本硕士学位论文第五章)

致 谢

随着本文的完成，三年的硕士生涯也接近尾声，这三年收获太多，也有太多的人需要感谢。

首先最深的谢意要给我的导师李涛副教授，在三年的学习和科研中，她对我付出了太多心血。从论文的开题，中期一直到论文的完成，无不得到老师的无微不至的关心和指导。导师学风严谨，知识渊博，平易近人，无论是在学业、思想还是做人方面都对我有着很大启迪，终身受益。

在本课题的研究中，教研室的姜秋宏师姐，彭世通师兄和高旺同学都给了我很多帮助，对他们表示衷心的感谢，祝他们前程似锦。

三年里，韩正金和张伟两位舍友在生活和学习上都给了我许多帮助，感谢他们。

还要感谢大连理工大学提供了一流的学习、科研和生活条件。

最后要感谢我亲爱的家人，他们的爱和支持是我前进的动力！

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目： 基于多种清单分析方法的压缩机转子生命周期评价

作者签名： 王亮 日期： 2017 年 6 月 12 日

