

分类号: TH122
密 级:
单位代码: 10359
学 号: 091102070285



合肥工业大学
Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER DEGREE THESIS

论文题目: 产品生命周期评价中清单的不确定性分析
学位类别: 学 历 硕 士
学科专业: 工 业 工 程
(工程领域)
作者姓名: 朱 立 红
导师姓名: 刘光复 教授
完成时间: 2012 年 04 月



生命周期评价中清单的不确定性分析

**Uncertainty Analysis of The Inventory in LCA of
Product**

作者姓名	朱立红
学位类型	学历硕士
学科、专业	工业工程
研究方向	工业工程系统理论、分析及 决策方法研究
导师及职称	刘光复 教授

2012 年 4 月

合 肥 工 业 大 学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合合肥工业大学硕士学位论文质量要求。

答辩委员会签名：（工作单位、职称）

主 席：

王成
合肥美路有限公司

委 员：

程辉明 中国电科38所

刘志峰 合肥工业大学教授

孙琳 合肥工业大学副教授

宋子洋 合肥工业大学副教授

导 师：

刘志峰 合肥工业大学教授

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标志和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 合肥工业大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签字：朱立红 签字日期：2012 年 4 月 28 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 合肥工业大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅或借阅。本人授权 合肥工业大学 可以将学位论文的全部或部分论文内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文者签名：朱立红

导师签名：



签字日期：2012 年 4 月 25 日

签字日期：2012 年 4 月 25 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

摘 要

生命周期评价方法（LCA）是现阶段评价产品对环境的影响，以及衡量产品的绿色性能的方法之一。评估产品全生命周期对环境的影响并指导其改进设计是目前绿色设计与制造的核心，它对整个设计过程和设计方案的完善具有重要的指导作用。随着 LCA 的成熟和发展，其可靠性和不确定性也越来越受到各界研究者的关注。论文就生命周期评价中的不确定性问题进行了分析和阐述：首先，将生命周期评价中的不确定性按照来源分类，并重点对清单的不确定性进行分析；其次，针对清单不确定性，将清单数据分类，并对数据缺失和不准确等问题提出了相应的解决方法，将处理后的清单数据进行质量打分并根据每个数据的质量分值建立随机分布，清单数据的随机分布可以获得足够的数据，根据回归分析理论建立清单参数与最终结果之间的线性关系，通过回归分析获得对最终结果不确定性有较大影响的因素，从而指导 LCA 初期评价模型的建立与清单数据的收集，提高 LCA 评价结果的可靠性；最后，以洗碗机清单为实例验证了该不确定性分析方法的可行性。

关键词：生命周期评价；不确定性分析；数据质量评价；敏感性分析；洗碗机

Uncertainty Analysis of The Inventory in LCA

ABSTRACT

Life Cycle Assessment (LCA) is one of the method for the evaluation of environment impact and the measurement of green performance of products. Assessing environment impact of Product Life-Cycle and guiding the redesign are the core of green design and manufacturing, which play an instructive role in the process of design and improvement. With the maturation and development of the LCA, reliability and uncertainties have gaining ever increasing concerns by researchers from all walks of the society. In this dissertation, the uncertainties in LCA were discussed: Firstly, the uncertainty in LCA is classified according to it's sources, and the uncertainties of inventory are analyzed mainly. Secondly, Against to the uncertainties in the inventory, the list data are classified and the corresponding methods are proposed to deal with the gap data and inaccurate data. Then, the solved data are scored and the random distribution of every data are established in the inventory according to the integrated score. So the sufficient data can be obtained according to the distribution. Then, by the regression analysis theory, the linear relationship between the inventory parameters and the final analysis results is established, the major parameters to the uncertainty can be obtained through the regression analysis to guide for the establishment of the primary evaluating model and data collection, so as to improve the reliability of the results in the LCA. Finally, dishwasher inventory has been taken as an example to verify the feasibility of the measures of uncertainty analysis.

Keywords: Life Cycle Assessment; Uncertainty Analysis; Data Quality Assessment; Sensitivity Analysis; Dishwasher

致 谢

暮春三月，莺飞草长。在这乍暖还寒的季节，我的求学生涯即将告一段落。三年的读研岁月，校园里的路走过千百遍，看不厌的四季流转，春华秋实，夏阳冬雪。感谢老师、朋友和同学，与你们的相遇、相处、相知的点点滴滴，让我感慨、感动、感激。

在此论文完成之际，首先感谢我尊敬的导师刘光复教授！本文是在刘老师的悉心指导下完成的，在三年的研究生学习生涯中，刘老师给予了我大量的指导，给我创造了良好的学习与科研条件。刘老师学识渊博、视野开阔、治学严谨，是我为人和治学的榜样。刘老师的谆谆教诲我将铭记于心，我深感自己所取得的每一点点成绩和每一次的进步无不凝聚着导师大量的心血，谨向刘老师致以最崇高的敬意和衷心的感谢！

衷心感谢刘志峰教授、宋守许副教授、张雷副教授和黄海鸿副教授，三年来各位老师在学习和生活上给予了我很大的关心和帮助；特别感谢刘志峰老师和张雷老师，他们在学习和课题研究中给予了我大量的指导，本论文的选题和撰写也得到了两位老师的悉心指导！

感谢胡迪、鲍宏、高洋、王正、张敬东、王进京、凌波、王吉凯、李园、赵吉儒、张曦、陈杨、曹灵莉、胡柏林、蒋浩、曾志敏、等博士和硕士，感谢室友唐金栓、王玉倩、施银燕，感谢施英莹、张磊、蒋云、顾国刚、刘琳、湛阳等已毕业的硕士，他们在我研究生生活和学业中给予了我支持和帮助，感谢他们！

感谢我的家人。感谢父母对我的养育之恩，感谢家人在生活、学习、工作等各方面给予的支持与付出。没有他们的关怀和帮助，我不可能完成我的学业，在此表达我对他们诚挚的感谢和祝福！

最后，向所有给予我关心、支持和帮助的老师、同学和亲友致以由衷的谢意和美好的祝福！

作者：朱立红

2012年4月15日

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.1.1 课题研究背景	1
1.1.2 论文研究意义	3
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 国外研究现状	5
1.2.2 国内研究现状	7
1.3 论文主要工作内容	7
第二章 生命周期评价及不确定性	9
2.1 生命周期评价方法	9
2.1.1 生命周期评价定义	9
2.1.2 生命周期评价的特点	9
2.2 生命周期评价框架	10
2.2.1 目的与范围确定	11
2.2.2 清单分析	12
2.2.3 影响评价	13
2.2.4 结果解释	14
2.3 生命周期评价工具	14
2.4 生命周期评价中的不确定性	15
2.4.1 生命周期评价中的不确定性定义	15
2.4.2 不确定性数学理论	15
2.4.3 生命周期评价中的不确定性来源	17
2.4.4 生命周期评价中的不确定性分类	17
2.5 本章小结	17
第三章 生命周期评价中清单数据的分类及质量评价	18
3.1 生命周期评价中清单的不确定性	18
3.1.1 清单不确定性的产生来源	18
3.1.2 清单不确定性的表达和传递	19
3.2 生命周期评价中清单数据的收集和分类	19
3.2.1 清单数据分类	19
3.2.2 清单数据收集方法	20
3.3 生命周期评价中清单数据的质量评价	21
3.3.1 清单数据质量目标	22
3.3.2 清单数据质量指标	23
3.3.3 数据处理	24

3.4 本章小结	25
第四章 清单数据不确定性及敏感性分析方法	26
4.1 清单不确定性分析方法及框架	26
4.1.1 不确定性分析	26
4.1.2 清单不确定性分析框架	26
4.2 清单不确定性分析方法	28
4.2.1 清单参数概率分布	28
4.2.2 多元线性回归分析清单不确定性	29
4.3 清单敏感性分析	31
4.3.1 敏感性分析	31
4.3.2 不确定性敏感性分析	33
4.4 本章小结	33
第五章 实例与应用研究	34
5.1 洗碗机清单数据质量评价	34
5.1.1 洗碗机生命周期评价输入清单来源	34
5.1.2 洗碗机清单数据分类	35
5.1.3 洗碗机清单数据质量评价	37
5.2 洗碗机清单不确定性分析与敏感性分析	38
5.2.1 统计分析软件 SPSS 软件介绍	38
5.2.2 清单回归模型的建立及不确定性与敏感性分析	39
5.3 本章总结	41
第六章 总结与展望	42
6.1 全文总结	42
6.2 工作展望	42
参考文献	43
攻读硕士学位期间发表的论文	47
攻读硕士学位期间参与的科研项目	48

插图清单

图 2-1 生命周期各阶段	9
图 2-2 清单分析流程图	13
图 2-3 LCIA 影响和危害模型的环境机制示意	14
图 3-1 不确定数据类型	25
图 4-1 生命周期清单不确定性分析框架	27
图 4-2 不同形状参数 α 和 β 的 β 分布概率密度函数	29
图 5-1 柜式洗碗机外观图	34
图 5-2 洗碗机装配过程	36

插表清单

表 1-1 国内全球产量第一的规模产品制造能力计表	1
表 1-2 欧盟环保法规发展概况	4
表 1-3 近年来 LCE 会议信息	6
表 2-1 数据质量考虑的主要因素	11
表 2-2 LCA 工具软件	15
表 3-1 清单数据分类	20
表 3-2 国外已发布数据库	21
表 3-3 数据质量指标矩阵	24
表 4-1 综合数据质量指标概率分布表	29
表 5-1 洗碗机材料清单表	35
表 5-2 洗碗机制造加工输入清单	36
表 5-3 使用阶段输入输出表	37
表 5-4 回收阶段输入数据	37
表 5-5 洗碗机输入清单数据质量矩阵	37
表 5-6 洗碗机耗材与能耗数据质量表	38
表 5-7 回归系数表	40
表 5-8 方差分析表	40
表 5-9 偏回归平方和	41

第一章 绪 论

1.1 课题研究背景与意义

1.1.1 课题研究背景

21 世纪以来，随着社会的进步和经济的发展，世界各领域新思想、新理论和新技术层出不穷，人类文明步入了一个全新的时代，这也是人类社会以往各个历史时期都望尘莫及的，是无法比拟的。在人类文明不断前进的同时，也面临着越来越严峻的困难和挑战：环境、资源和人口之间的关系，目前全球各地均受其困扰，这三大问题是当今社会面临的主要问题^[1]。

科学技术的快速发展加快了产品更新换代的速度，家电产品的更新换代速度也越来越快，如电冰箱、洗衣机、空调、彩电等，全球淘汰的产品也越来越多，如电脑、电子产品等。随着家电行业的发展和市场需求的扩大，各种家电产品的生产量逐年上升，每年报废的家电产品数量也非常惊人，随着回收产业的发展 and 世界各国对环境的重视，世界很多国家出台了一系列关于产品和材料的环保法规来减少制造对环境的影响，因此产品或材料的回收技术逐渐成熟，研究产品全生命周期对环境的影响的研究技术也越来越成熟。

20 世纪 60 年代以来，我国逐步发展为全球制造大国，据不完全统计，有超过 100 种制造业产品形成了大批量生产能力，其中一些产品更是居于国际首位，如表 1-1 所示^{[2]-[3]}。

表 1-1 国内全球产量第一的规模产品制造能力计表

产品名称	生产规模	百分比	产品名称	生产规模	百分比
彩电	3936	29%	摩托车	1153 万辆	44%
洗衣机	1443	24%	拖拉机	210 万台	83%
电冰箱	1279	16%	电话机	9598 万台	≥50%
空调	1827	30%	显示器	4500 万台	42%
电风扇	7661	≥50%	钟表	15 亿只	75%
照相机	5514	≥50%	微特电机	30 亿只	60%
微波炉	1257	30%	一次性电池	170 亿只	40%
电饭锅	1355	--	数字程控交换机	3000 万线	--
吸尘器	1010	--	抽油烟机	366 万台	--
自行车	4270	40% (1999)	人造金刚石	10 亿克拉	≥60%
太阳能热水器	600 万平米	--	集装箱	153 万 TEU	83%

由表 1-1 可知，国内家电行业的发展越来越快，家电产业带动了国民经济的发展和人民生活质量的提高，同时也给我国和世界各国带来了挑战。

(1) 家电行业在国民经济中的地位

家电行业的发展可以极大的带动钢铁、橡胶、化石、机械、电子、金融服务等相关产业的发展，在社会经济生活中发挥着巨大的作用。家电行业在发达与发展中国家的经济发展中扮演了非常重要的角色，也对我国的经济发展做出了重要贡献。21 世纪以来，我国家电行业在国民经济中的地位不断提升。据统计数据显示，2009 年，我国家用电器和电子信息产业占我国 GDP 的比重约为 10%，占我国出口总额的比重约为 35%，如果考虑家电行业对相关产业的带动，家电行业对国民经济的拉动作用远大于 10%，家电行业已经成为我国国民经济的支柱产业。

（2）我国是家电产销大国

20 世纪 60 年代以来，我国家电行业经历了多年的飞速发展，家电市场也逐渐壮大，并且成为了全球家电市场的重要组成成分。根据国家统计局数据可知，1996 年，我国主要家电产品产量在全球市场名列前茅，如电冰箱、洗衣机、电熨斗、电风扇、电饭锅等产品产量居世界首位，空调器和电视机的产量也进入世界前列^[4]。1998 年，我国家电产业销售额达到了 1320 亿元，约占世界总量的 7%，仅次于美国、日本，居世界第三；2002 年上半年日用电器行业的产销率（按现价计算）为 94.69%，低于轻工全行业 96.28%的水平^[5]，同时，各类家电产品产销量也存在差异，洗衣机产销率为 99.69%，电冰箱产销率为 95.20%，因天气原因空调器行业产销率稍低，只有 92.80%，较家电行业平均水平低 1.8 个百分点；2003 年，我国电冰箱、洗衣机的生产规模均已达到全球总量的 20%^[6]，空调器、微波炉产量均已接近全球生产总量的 60%，并已形成一批国内著名品牌^[8]；2010 年，我国家电产业整体运行态势良好，全年增幅超过 20%，一季度同比增幅达 23.4%；2011 年首季度表现平稳，据相关数据显示，一季度家电市场销售额增幅明显放缓，白色家电、小家电产业市场表现略好，同比增速分别为 10.7%和 5.9%，但受累于低迷的黑电产业市场（负增长 0.8%），使得整体家电市场规模与去年同期相比仅微增 1.7%，一季度中国家电市场销售额总规模为 2696 亿元^[7]。

（3）家电行业面临的挑战

随着人类社会的进步发展，地球也在不断地被改造着，特别是在上世纪的一百年里，社会生产力得到极大提高，科技也得到了迅猛的发展，世界经济规模得到了空前的扩大，人类所创造的财富达到了以前几千年历史的总和都无法超越的程度。然而，人类对自然资源的大肆开采及超过环境承载力的污染，已经造成了严重的生态破坏、环境污染和资源紧张等严峻的问题^[1]。

家电行业经过多年的发展，在生产过程中不可避免的产生了大量的工业废弃物，加快了环境恶化的速度，损坏了可持续发展的长远目标^[2]。资源，能源和环境已经成为全世界各国共同关注的问题，尤其是环境问题正逐步对人类的生存和发展造成严重的威胁，主要体现在以下几方面^[1]：

(1) 工业化后, 人类生产活动排放的二氧化碳等温室气体大量增加, 温室效应越来越严重, 造成了全球气候变暖甚至导致极端天气的出现。

(2) 生产活动过程排放的氯氟烃类物质对臭氧层的损耗, 使得人类得各种皮肤病的几率增加。

(3) 当今工业生产主要采用高投入、高消耗的粗放型方式, 对资源和能源的摄取远高于环境对经济的承载能力, 从而造成环境资源的枯竭。

(4) 工业生产中产生的大量的固、液废弃物造成了大量的地下水被污染。

(5) 由于人口和经济的快速增长, 产品更新换代的速度加快, 废弃产品产生的环境影响相当严重。

1.1.2 论文研究意义

近年来, 一系列环保法规(见表 1-2)的相继出台, 使得家电制造业不得不审视其产品的绿色性能, 继而产品的绿色设计就成了企业考虑的一个重点。生命周期评估(LCA)是绿色设计中的一个重要的环节, 为产品的绿色设计提供了一种有效的分析工具^[8]。只有通过评估, 才能确定所进行的设计是否满足预期的目标和要求、是否有利于改进对环境的影响等。因此, LCA 对完善整个设计方案和指导设计过程具有非常重要的意义。

LCA 也存在着局限性和不确定性, 如产品系统边界的界定、输入输出清单数据的收集和获取、评估分析模型的建立以及分析评估过程中所涉及的各种假设等^{[9]-[11]}, 在这些不确定性中, 以生命周期清单(Life cycle Inventory, LCI)分析的不确定性最为突出。不确定性的定义是: 用来判定和量化由于输入的不确定性和数据变动的积累给 LCA 结果带来的不确定性的系统化程序。生命周期清单不确定性产生的原因主要有^{[12][13]}:

(1) 由不良定义引起的不确定性(如系统边界的确定)。

(2) 来自收集过程或量的不确定性, 按照所使用的方法包括: 来自测量的不确定性; 来自取样的不确定性; 来自未被描述完整的参考数据的不确定性; 来自专家判断的不确定性及关键数据缺乏等等。

如果将这种具有不确定性的清单按单一确定的输入输出数据进行评价, 不仅容易导致生命周期清单分析结果的不同, 而且还会对生命周期环境影响的评价产生影响, 因此必须对这些不确定性进行分析。LCI 不确定性在生命周期的所有不确定性中最为突出, 研究 LCI 的不确定性有非常重要的意义:

(1) LCI 是 LCA 中进行基础数据收集和處理的主要阶段, LCA 结果的可靠性和可信程度在很大程度上取决于清单数据质量, 减小 LCI 数据的不确定性, 可以提高生命周期评价结果的可靠性;

(2) 生命周期清单中所包含的数据成百上千, 甚至更多, 且每个数据的概率分布函数又不容易评估和确定, 需要耗费大量时间和精力去统计和拟合。通过对清单中不确定性的量化处理识别不确定性源, 并进行敏感性分析, 有助于

指导研究人员改进清单和收集数据，一方面针对重要的不确定性参数要收集更具代表性的数据，减少其对结果的影响；另一方面可忽略较稳定的、对结果影响较小的数据，节省大量的时间和精力解决主要问题。

表 1-2 欧盟环保法规发展概况^{[1]-[3]}

指令/规范名称	主要管控内容	管控时间
包装及包装废弃物指令 (94/62/EC、2004、12、EC、 2006、340、EC)	包装材料有害物质 (Cd、Pb、Hg、Cr ⁺⁶) 含量总和不能超过 1000ppm。	2001-07-01
	废弃物回收/能源回收率>60%: 再利用率 55-85%; 各材料回收目标 16%-60%。	2008-12-31
电子电气设备禁限用有害物质 (ROHS,2002/95/EC)	电子电气设备 (钨丝灯泡、家用灯具与医疗设备 & 监控设备除外) 有害物质含量。Pb、Hg、Cr ⁺⁶ 、PBBs、PBDEs<1000ppm; Cd<100ppm。	2006-07-01
废弃电子电气设备指令 (WEEE,2002/96/EC)	应建立废弃电子电气设备回收体系	2005-08-13
	废弃电子电气设备回收处理目标: 平均回收量达到 4kg/人·年; 各类别产品回收率 50-75%; 再生利用率 70-80%。	2006-12-31
	电子电气产品回收处理信息披露。	上市一年内
能耗产品生态化设计指令 (EuP, 2005、32、EC)	应评估产品生命周期各阶段的环境冲击, 改进环境绩效, 并编制生态说明书 (ecological profile)。产品结合 CE 标志的市场机制。	2007-08-11
关于限制全氟辛烷磺酸销售及使用的指令 (PFOS,2006/122/EC)	规定各欧盟成员国须于 2007 年 12 月 27 日依据指令实施有关法例, 主要影响: 地毯、皮革、纺织品、服装、纸张、包装品、灭火器等禁用全氟辛烷磺酸盐 (perfluorooctane sulfonates, PFOS)。	2008-06-27
多环芳香烃浓度限制指令 (PAHs,2006/69/EC)	如果填充油含有 PAHs 超过以下标准, 不得投入市场或用来生产轮胎与相关物件; BaP 不得超过 1mg/kg; 所列出 PAHs 总含量不得超过 10mg/kg。	2010-01-01
化学品注册、评估、授权和限制指令 (REACH,EC NO1907/2006)	REACH (Registration,Evaluation and Authorization of Chemicals), 是一个化学品注册、评估及授权机制, 在法规系统中, 欧盟生产或进口化学物质 1 吨/年以上的企业都将收到法规的管控, 并须进行物质登记或注册。	2007-06-01

(3) 通过不确定性分析识别清单参数后,可以检验系统边界是否合适,如扩展系统边界将一些重要的单元过程包括进来,以及去掉一些不重要的生命周期阶段或工艺子系统。

(4) 通过不确定性分析结果指导简化模型中的假设,使模型更具代表性。

(5) 不确定性分析有助于在评价前期指导数据的分类、采集和关注。数据收集是生命周期评价的基础,如果能够评估出清单数据的不确定,则可以指导研究者在数据收集过程中,对数据采取有区分的收集,并对不确定性较大的数据给与更多关注,采取更加合理的方法获得数据。

(6) 通过生命周期评价以及不确定性分析,可以得知评价结果的可靠性,指导决策者在决策初期做出更好的决策。

(7) 不确定性分析为检验 LCA 结果可靠性提供了一种方法,对提高和改进产品 LCA 方法有实际意义。

1.2 国内外研究现状

近年来,国内外对 LCI 中的不确定性分析进行了较多的研究,相比国外,国内对 LCI 的不确定性分析研究做的还比较少。

1.2.1 国外研究现状

国外对生命周期评价研究起步较早,上个世纪 90 年代,LCA 得到快速发展。国外对 LCA 研究较早的组织之一:国际环境毒理学会与化学学会(SETAC),首次在其组织召开的关于生命周期评价的国际研讨会上提出了生命周期评价的概念,从此之后 LCA 得到越来越多的关注,越来越多的学者致力于相关研究。荷兰莱顿大学 Reinout Heijungs 等发表了第一篇关于生命周期评价的科学论文,此外,国际生产工程科学院(CIRP)、联合国环境规划署(UNEP)、世界自然基金会、丹麦工业大学、合肥工业大学等机构也展开了关于 LCA 的国际会议,促进了 LCA 方法与应用的发展^[14]。然而,生命周期评价方法的研究仍在不断发展中,有许多研究机构在帮助建立 LCA 研究共识和提出建议,如 SETAC 和 UNEP 的生命周期行动等。此外,自 90 年代初期以来,国际生产工程科学院每年组织召开生命周期工程(Life Cycle Engineering, LCE)会议,探讨与生命周期评价相关的研究,为 LCA 研究的发展提供了很大的动力,表 1-3 为最近几年 LCE 会议的信息。

国外对 LCI 不确定性分析的研究主要有:Mark A. J. Huijbregts^[16]等对数据不精确提出了不确定性分析模型,将数据不确定性分为两类:缺乏数据和数据不精确,并为每一种数据不确定性类型提出了相应的解决方法,给出了第二种类型的不确定性传播分析模型;John R. May^[17]等提出了定性与定量的分析不确定性的方法,并提出了将两种方法结合的新方法;Raymond R. Tan^[18]等提出了基于矩阵的 LCI 模型和基于过程的 LCI 模型,该研究提供了一个将

表 1-3 近年来 LCE 会议信息

召开时间	会议名称	会议主题	会议地点	组织者
2006 年 5-6 月	LCE2006	面向循环经济	比利时·鲁汶	CIRP, 比利时天主教鲁汶大学
2007 年 6 月	LCE2007	LCE 在可持续制造产业中的进展	日本·东京	CIRP, 日本精密工学会, 日本早稻田大学
2008 年 5 月	LCE2008	应用生命周期知识于工程解决方案	澳大利亚·悉尼	CIRP, 澳大利亚新南威尔士大学
2009 年 5 月	LCE2009	可持续时代的生命周期工程	埃及·开罗	CIRP, 加拿大温莎大学
2010 年 5 月	LCE2010	基础理论, 可持续制造: 应用技术和未来发展前景	中国·合肥	CIRP, 合肥工业大学

Buckley's fuzzy EIO 向通用 LCI 模型扩展的基础, 这个方法可以用于通过基于矩阵的 LCI 模型, 传递数据的不确定性, 因此允许在模型输入中从参数不确定性的模糊分布中决定清单结果的不确定性, 这个手段试图确定多重不确定性模糊输入的传递影响; Fulvio Ardente^[19]等提出了一种敏感性分析来评估所选择的方法和所研究的输出数据的影响; Shih-Chi Lo^[20]等提出了用贝叶斯蒙特卡罗方法来定量和降低 LCA 中的不确定性分析; Bo Pedersen Weidema^[21]提出了对 LCI 进行数据管理的方法, 并给出了一个具体的实例; Reinout Heijungs^[22]等在提高 LCA 可靠性的深远研究中, 针对关键问题的鉴别, 提出了应用的和一般的方法; Bo P.Weidema^[23]提出了基于矩阵测试的产品生命周期清单数据的数据质量矩阵方法; Dale J.Kennedy^[24]提出了在生命周期评价模型中评价输入数据的不确定性的方法; Bengt Steen^[25]等提出了基于 LCA 优先设置的不确定性和敏感性分析, 并且描述了已经被提出的敏感性和重要性的分析的方法步骤; Anna E.Bjorklund^[26]提出了提高 LCA 可靠性的研究方法, 对数据质量定性与定量的方法以及数据敏感性分析和不确定性分析方法提出了方法介绍, 虽然没有具体的介绍但是对这个领域的深入研究提供了指导性的方法; B.Maurice^[27]等提出了 LCI 中的不确定性分析, 提出了定性与定量方法结合的方法来分析数据的不确定性, 定性方法用了数据质量向量方法, 定量的方法用了蒙特卡罗仿真方法, 并给出了实例; Hirokazu Sugiyama^[28]等提出利用标准统计学方法来考虑基于工业 LCI 数据库的不确定性分析; Georg Geisler^[29]等提出了基于植物保护剂案例研究和决策应用的 LCA 中的不确定性分析; Anders S.G.Andrae^[30]等提出了将蒙特卡罗模拟仿真方法应用到无线手机和微尺度成矿过程中去。

1.2.2 国内研究现状

国内对 LCI 不确定性分析的研究主要有：向东^[12]等提出了按照功能单元和过程的划分来对数据进行采集，利用统计学方法简单例举了生命周期评价中的不确定性和敏感性分析；莫华^[13]等提出了将质量指标法与蒙特卡罗法结合的方法，先确定每个参数的质量指标值，然后根据其指标值确定每个参数的概率分布并以此对清单不确定性进行模拟；赵辉^[31]等提出了生命周期清单基本分析方法并将其分为基于改进的过程流程图表法得到的过程分析法和输入—输出分析方法，并将两种方法不同程度的结合提出了三种 LCI 混合分析方法；王伟^[32]等利用《测量不确定度表示指南》已经提出的评定方法对复杂模型进行评定，给出了用蒙特卡罗方法评定测量复杂模型中的不确定性的原理和步骤；尹增谦^[33]等详细介绍了蒙特卡罗方法将不确定性问题转换为概率问题；郑元^[11]等提出了针对产品生命周期评价中普遍存在着的的数据的不确定性问题，提出基于概率统计的方法，用蒙特卡洛方法对各个清单参数进行随机模拟，将对环境影响较大的因素筛选出来，然后对筛选出的参数进行灵敏度分析；刘涛^[34]等针对数据的不确定性从数据的选择分析，提出了从两方面考虑：输入数据对清单结果贡献大小，输入数据的不确定性大小，分别将两者量化，引入分级二维象限图对其进行判断，筛选出对环境影响较大但或（和）不确定性较大的数据；任丽娟^[32]等综述了目前常用的生命周期清单的不确定性分析方法，包括定性的质量指标法、灵活性较强的蒙特卡罗法、以及两者结合的方法和常用的敏感性分析方法；钟流举^[36]等介绍了目前大气排放源清单定量不确定性分析方法框架，并使用电厂 NO_x 在线监测数据，通过实际案例量化排放源清单中的不确定性。

可见，国外对产品生命周期评价中存在的的天不确定性分析的研究方法用的最多的有数据质量管理方法和统计学方法，而且方法都比较详尽，在这方面做的研究也比较早，比较深入。目前，国外在该领域的研究方法也主要为数据质量方法和蒙特卡罗模拟方法，但是相比较国外，国内在这方面的研究相对较少，没有系统的完整的方法来定量生命周期评价中清单的不确定性的天大小及其传播。

1.3 论文主要工作内容

本文依托国家“十一五”科技支撑计划项目和国家“863”高科技资助项目，结合国内几家大型的家电厂商的合作项目，对部分家电产品生命周期评价中清单的不确定性进行分析并提出了分析的方法。随着 LCA 方法应用的成熟，其不确定性问题也越来越受研究者的重视，因此，论文结合目前国内外的研究，重点提出了清单不确定性的分析方法。论文主要内容包天括以下几方面：

第一章 绪论。介绍了论文的研究背景和意义，以及生命周期评价研究和不确定性研究在国内外的天发展现状。

第二章 生命周期评价方法及不确定性理论。介绍了生命周期评价的定义和特点，在此基础上介绍了产品生命周期评估框架体系，简单介绍了几种生命周期评价软件工具，最后提出了生命周期评价中的不确定性概念，并给与定义和分类，为下章分析做准备。

第三章 产品生命周期评价中清单数据的分类及质量评价。介绍了生命周期清单数据的分类和数据质量评价方法，数据的合理分类以及质量的可靠性，是影响清单不确定性的重要因素，因此，引入数据质量评价方法对清单数据质量给与合理的评价，以便之后的研究。

第四章 生命周期清单不确定性分析。提出了定性定量方法结合的综合的分析方法对 LCI 进行不确定性分析和敏感性分析。

第五章 实例与应用研究。以洗碗机为实例，验证了该方法的可行性。

第六章 总结与展望。对全文的内容进行了总结，并对下一步工作进行了展望。

第二章 生命周期评价及不确定性

2.1 生命周期评价方法

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）的概念最早出现于上世纪 60 年代末到 70 年代初，经过 40 年的发展，LCA 已经被纳入 ISO14000 环境管理体系标准并成为国际上环境管理和产品设计的一个重要支持工具。

2.1.1 生命周期评价定义

很多研究机构（如高校、政府等）都对生命周期评价进行了解释，不同的研究机构对它有不同描述。例如在学术界，国际权威机构 SETAC 对生命周期评价的定义为^[37]：生命周期评价方法是一个通过对原材料、能源以及排放物的识别和量化，评价与产品及其行动有关的环保责任，来评估产品的过程或其活动给环境带来的负担的客观的方法，从而获得这些能量和材料应用及其排放物对环境的影响，并评估各种方案以改善环境；在产业界，P&G 公司对 LCA 的定义为：显示产品制造商承担在其产品从设计到处理的全过程中对环境所造成的负担的责任的态度；国标 GB/T24040-2000 对生命周期评价的定义为^[43]：一种用于评价与产品系统有关的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编的技术。

概括而言，生命周期评价是一种对从获取产品原材料、生产、运输、使用维护直至最终产品的废弃回收处理的全过程进行环境影响分析和评估，从而获得产品生命周期各阶段的详细信息，为产品的改进设计提供详细、准确的信息。生命周期评价的研究通常分为四个步骤：第一步，目的与范围的确定；第二步，生命周期清单分析；第三步，生命周期影响评价；第四步，结果解释。

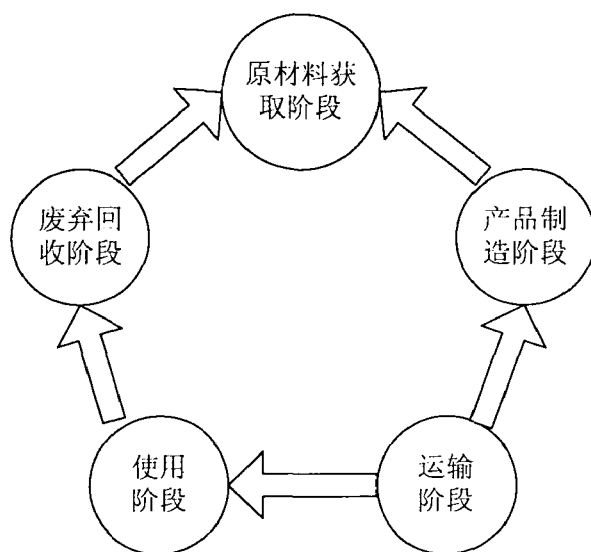


图 2-1 生命周期各阶段

2.1.2 生命周期评价的特点

与传统的环境影响评价方法不同，生命周期评价方法主要有以下特点：

(1) 生命周期评价方法是面向产品系统(“从摇篮到坟墓”)的评价方法。产品系统包括原材料的获取、产品的生产、产品的使用维护及末端的废弃回收处理。

(2) 生命周期评价涉及多学科领域,主要包括生态学、环境学、物理学、化学、毒理学、统计学、经济学等学科。生命周期评价应用多种技术如工程技术、工艺技术、测试技术、分析技术、信息技术等手段是多学科交叉的评价方法。

(3) 生命周期评价是一种面向产品系统的定量化评价方法。从产品系统的角度看,传统的环境影响评价局限于产品的生产制造阶段的观点有局限性。目前的研究表明,很多产品的主要环境影响并非产生在产品的加工制造阶段,而在使用维护阶段,如家电产品、汽车产品等能耗产品,因此仅仅通过控制产品生产过程中的排放物从而减少产品系统的环境影响是不全面的。因此,以产品为核心、评价整个产品系统总的环境影响的全过程将成为评价产品环境影响的必然趋势,而生命周期评价方法是该趋势下的评价方法之一。

生命周期评价方法虽然是目前环境影响评价的趋势,但是也存在一定的局限性:

(1) 缺乏标准化的生命周期清单分析方法(包括确定系统边界,数据选择标准,分析处理方法以及标准化的清单模型);缺乏有效的标准化数据库;在将清单分析结果转化为环境影响指标时,缺乏标准的模型方法。

(2) 由于评价过程中存在很多主观因素和决策选择,因此评价结果会存在很多不确定性,然而这些不确定性目前没有标准化的使用性好的方法来计算和确定,很多评价研究甚至没有对结果进行不确定性分析。

2.2 生命周期评价框架

生命周期评价是一个不断重复的过程。根据国际标准 ISO14040,生命周期评价包括四个步骤:目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释。生命周期评价的框架如图 2-1 所示,其具体的实现步骤为:

第 1 步:目的与范围确定。在进行生命周期评估之前,必须明确阐述评估的研究目的和系统边界,这是之后评估过程的立足点和出发点。

第 2 步:清单分析。一种定量描述系统物质流和能量流的方法,核心是在产品系统内建立以功能单位表达的产品系统的输入和输出。

第 3 步:影响评价。根据第二步分析的结果定量和定性的评估产品系统的环境负荷潜力。

第 4 步:结果解释。根据前几个阶段的研究或者清单分析,找出对环境影响最为显著的阶段,提出改善建议,从而减少产品系统生命周期过程所造成的环境影响。

2.2.1 目的与范围确定

生命周期评价的第一步是确定研究目的与界定系统范围，是整个评价过程的基础，将直接影响整个评价过程的可行性与最终结果的可靠性。开展清单分析或进行全面生命周期评价研究，通常是针对具体问题而进行的，因此问题的性质常常决定了研究的目的和范围。该步骤主要包括：研究目的确定、产品系统和系统边界的定义、功能单位的确定、数据质量的明确。

(1) 确定研究目标

生命周期评价研究的目标应包括进行某项研究的原因、目标以及它的研究对象，大致可以分为环境管理认证和评价改进两类。评价的目标在不同的生命周期阶段也会有所不同：例如在产品的设计阶段，评估的目标是对产品设计方案进行评价，找出设计方案存在的问题；改善产品的设计；针对既有产品系统，LCA 的目标在于筛选出各生命周期阶段内的显著环境影响，并对产品相应的生命周期阶段提出改进意见以减小对环境的负担。

(2) 定义产品系统和系统边界

产品系统不能仅从最终产品的角度来阐述，因为它的基本性质取决于它的功能。产品系统是由提供一种或多种确定功能的中间产品流联系起来的单元过程的集合，通过物质与能量的利用与循环，为人类提供产品或服务。它由系统内部与系统环境组成。系统环境包括产品系统原料与能源的来源和其产品与排放物的汇集。产品系统主要包括产品单元过程、通过系统边界的基本流和产品流以及系统内部的中间产品流^[38]。

(3) 功能单位

功能单位是对产品系统功能的测量，是与所确定的研究目标相符的必须是明确规定并且可测量的、与输入输出数据有关^[38]。它是整个生命周期评价的基础，因为功能单位决定了产品之间进行比较的基准。在清单分析过程中采集到的全部数据都必须转换为功能单位。其目的在于对产品系统的输入和输出进行标准化和统一化。产品的效率、产品的使用期和质量标准是在定义功能单位时需考虑的三方面因素。

表 2-1 数据质量考虑的主要因素

因素	说明
代表性	数据样本与研究目标的符合程度
准确性	数据测量方法的可靠性程度以及校验程度
时间相关性	数据与研究目标年代的相关性和一致性程度
技术相关性	与研究目标企业及目标工艺的相似性程度
地理相关性	与研究目标所在区域的相关性
可重复性	不同的 LCA 研究人员可否根据所报告的数据和方法得出相同结果

(4) 数据质量

最终评价结果的可靠性在很大程度上由清单数据质量决定。它主要涉及时间跨度、空间跨度、技术覆盖程度、测量方法的科学性以及准确性等等,由于清单数据在评价中存在的 uncertainty 会影响最终结果的可靠性,因此由清单数据导致的 uncertainty 评价是本论文研究的重点。

2.2.2 清单分析

生命周期清单分析 (Life Cycle Inventory, LCI) 是生命周期环境影响评价的基础,是生命周期评价的第二个步骤。清单分析的主要工作是收集详细数据,即产品在 LCA 各阶段对资源和能源的使用情况,以及向环境的排放,也可以看成是收集和分析产品在 LCA 各个阶段的输入、输出的详细数据。是一个反复验证和修改的过程。其主要步骤如图 2-2 所示,从图可以看出它是一个不断重复和循环的过程。

(1) 数据收集准备。生命周期评价研究目标与系统边界确定后,相关的单元过程和数据类型也就初步确定了。具体包括以下几方面收集准备:

(1.1) 绘制产品过程流程图,以描绘所要建立模型的单元过程及其相互关系。

(1.2) 详细表述所描绘的每个单元过程,并列出其相关的数据类型。

(1.3) 汇编计量单位清单。

(1.4) 针对前面所确定的每种数据种类,编写数据采集技术的相关说明,使数据收集人员理解该项生命周期评价研究所需要的信息。

(1.5) 对需收集的数据的特殊情况、异常点及其他问题予以明确的文件记录。

(2) 数据收集。具体的数据收集方法在本文第三章中有详细介绍。

(3) 计算表达。整个产品系统的最终的环境交换总量表达为每个功能单位的输入和输出,本文采用以下表达式计算^[33]:

$$S_i = T \times \sum_{up} S_{i,up} + \frac{T}{L} \times \sum_p S_{i,p} \quad (2-1)$$

式中, S_i 为某个功能单位第 i 种输入输出的总和; T 为功能单位的期限(年); L 为产品寿命(年); $S_{i,p}$ 为产品系统关键工艺中第 P 个过程单元的第 i 种输入输出交换量; $S_{i,up}$ 为每年使用过程中输入输出量。

(4) 分配原则。分配应根据所做 LCA 研究目标来进行,在输入与输出物质平衡的基础上,尽可能反应产品系统的输入与输出的基本关系和特性。遵循 ISO14040 所规定的分配原则,对具体的问题给与合理的分配程序。

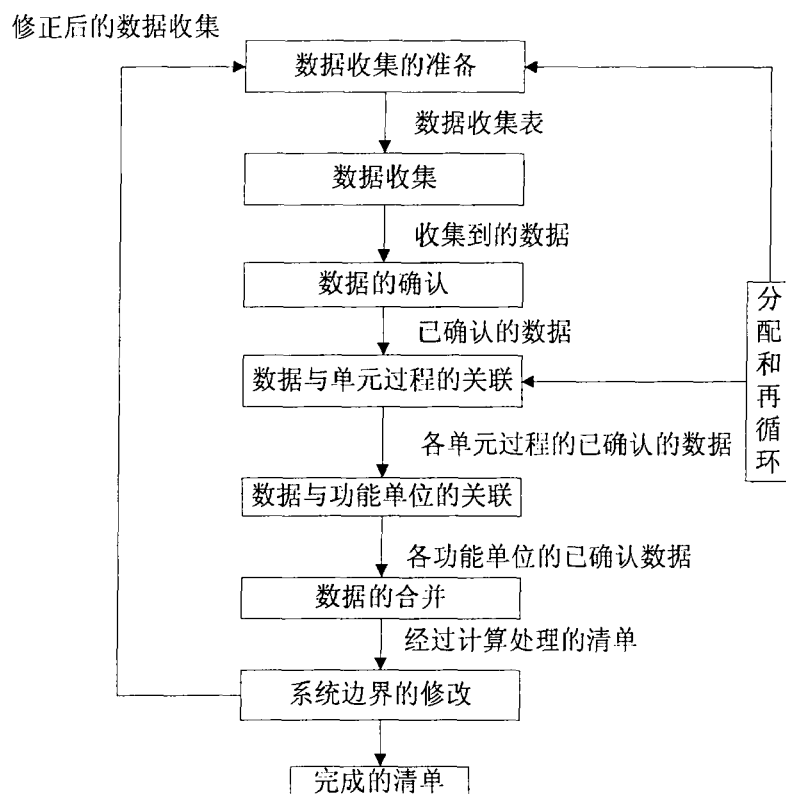


图 2-2 清单分析流程图

2.2.3 影响评价

生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)是生命周期评价的第三步,是对清单阶段识别出来的环境影响数据进行定量和(或)定性的描述,其目的是为评价清单分析结果提供更多详细的信息,以更好地理解环境的重要性。英国 EPA、ISO 和 SETAC 都倾向于把影响评价定位为一个“三步走”的模型,这三步是:影响分类、特征化、评估^[38]。

影响分类阶段实质上是將生命周期各阶段的清单编目与环境危害种类一一对应并进行定性或定量排序比较的一个过程,是一个基于自然科学知识的定性的过程。根据 ISO 规定,在 LCA 中可以用两种方法对环境危害进行分类(见图 2-3),中点型分类方法将环境危害分成 3 类:资源消耗、人体健康危害、环境影响,终点型分类法则是将这些危害细分并具体化:如温室效应引起的全球变暖、臭氧层减少、酸雨、富营养化、沙漠化等等。

特征化是对比分析和量化的过程。它是一个定量的过程,通常的方法是按照环境影响的类型建立清单编目与污染接触程度和污染效应对应的环境影响模型。面向环境影响模型研究不同影响类型的当量因子或潜力因子,如:人体潜在毒性潜值、全球变暖潜值(GWP)、臭氧层耗竭潜值(ODP)等。

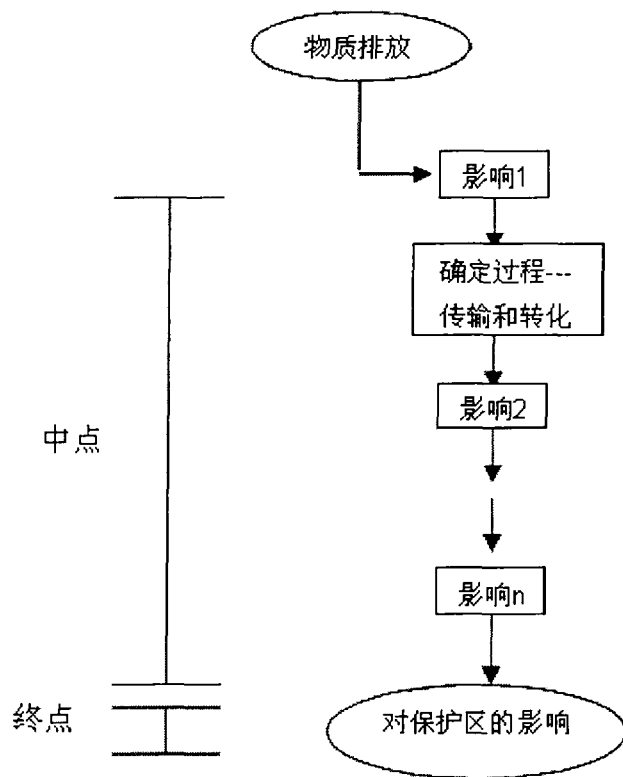


图 2-3 LCIA 影响和危害模型的环境机制示意

2.2.4 结果解释

结果解释是 LCA 研究的最后一步，将前几个阶段的研究或清单分析的结果与环境影响评估的结果结合在一起得出结论和建议。系统的评估产品在工艺、过程、活动等生命周期内能源的消耗、原材料消耗和环境排放物的需求与机会。通过分析定性和定量的改进措施或技术，如材料的替代和重新选择，产品结构或工艺的改变，改变消费方式和使用方式等，同时也可以为决策者提供直接需要的相关信息。

2.3 生命周期评价工具

生命周期清单分析涉及大量的数据，因此建立清单分析数据需要耗费大量的时间和精力。为了促进 LCI 的发展，过去几十年发展中得到了很多数据库，其中主要包括公用数据库，共用数据库和企业数据库等。同时也出现了很多生命周期评价软件，这些软件提供了一部分数据库与生命周期影响评价模型，更方便研究人员进行 LCA 研究。目前比较著名的软件有德国 IKP 大学的 GaBi 软件，荷兰 Pre 公司的 SimaPro7.0 软件、Eco-IT 软件，荷兰 TNO 公司的 Eco-Scan Life 软件等。表 2-2 对这些软件的特点进行了说明。

表 2-2 LCA 工具软件

LCA 工具	开发者	类型	影响评价	能否用于复杂产品	数据可靠性
GaBi	Institute for Polymer Testing and Science.IPK(D)	量化工具	是	是	是
SimaPro	Pre Consulting(NL)	量化工具	是	是	是
DEMS	PIRA international(UK)	量化工具	是	是	是
IDEA	VTT(SF)	量化工具	是	是	是

2.4 生命周期评价中的不确定性

随着生命周期评价方法的日渐成熟及评价软件的增加，很多评价者通常忽略了生命周期评价中的各种不确定性，这些不确定性将会使得最终结果产生偏差。因此，本小节总结归纳了生命周期评价中的不确定性来源和种类。

2.4.1 生命周期评价中的不确定性定义

数学中将不确定性概念定义为：如果一个概念的内涵或外延中有且只有一个不明确，那么这个概念就是不确定性概念。如模糊概念、属性概念和随机概念等都是不确定性概念^[39]。数学上不确定性的定义为：测量值与真实值之间的差别。近年来，有不少学者对生命周期评价的不确定性给与了各自的定义，其中 M.A.J. Huijbregts 定义的不确定性^[16]“在 LCA 过程中存在的由于测量的不准确、数据缺失、模型假设等所引起的对输出结果的影响”比较有代表性。因此，LCA 不确定性可以概括为：与评价有关的并可能影响最终结果可靠性的因素。

2.4.2 不确定性数学理论

目前不确定性理论主要有三种：概率论(Probability)、模糊理论(Fuzzy Theory)与灰色系统理论(Grey System Theory)。三种理论的研究导向分别为^[36]：

(1) 概率论：依据概率分布，通过统计的方法解决对象通常样本量大、数据多但缺乏明显的规律的问题，即“大样本不确定性问题”；该理论要求典型的分布；研究的目标强调统计数据与历史关系，即研究历史的统计规律。由于研究历史规律，决定了它的思维方式是重复再现(类比)；立足于大样本，追求无穷信息。

(2) 模糊理论：模糊数学处理人的经验与认知先验信息的不确定问题，即“认知不确定性”问题；其依据的手段为隶属度，边界取值；模糊要求隶属函数；其目标强调先验经验，依赖人的经验，研究经验认知的表达规律；模糊论将不确定的外延用隶属函数表达，这就是外延量化；模糊论立足于经验丰富，立足于以经验为内涵的隶属度函数。

(3) 灰色系统理论：用灰色理论针对既无经验、又少数据的不确定性问题，即“少数据不确定性”问题；灰色为信息覆盖，是灰生成即数据处理、信息加工；灰色由于少数据，就不可能构成某种分布即为非典型分布；该理论强调信息优化，研究现实规律；灰色系统理论立足于序列，而非函数，立足于对称，而非任意取点。

由于产品生命周期清单涉及的数据通常比较庞大，对于大样本不确定性对象，在基于概率论的信息论中，提出了信息熵的概念，并给出了其度量的方法：

(1) 自信息

据著名学者 Shannon 对信息的定义，信息所含信息量的度量就是要确定接收者在接收到消息后能够解除的对信息源所存在的不定度^[40]。如果把随机变量看做信息，则可以应用概率来测定其不确定性大小，首先引入一些相关的概念和性质说明。

随机变量的概率空间表示为：

$$\begin{bmatrix} X \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_k \\ p(x_1) & p(x_2) & \cdots & p(x_k) \end{bmatrix}$$

显然有： $p(x_i) \geq 0, \sum_{i=1}^k p(x_i) = 1$ 。

某个随机事件（消息） x_i 出现的不确定性大小定义为自信息量，用这个随机变量出现概率的对数负值来表示：

$$I(x_i) = \log\left(\frac{1}{p(x_i)}\right) = -\log p(x_i) \quad (2-2)$$

其中， $p(x_i)$ 为随机变量 x_i 发生的概率， $p(x_i) = \Pr(X = x_i)$ 。本文将自信息的底取为 e 。

(2) 信息熵

单个数据的不确定性不足以代表信息源的不确定性，由此引入信息熵的概念。如果信息源（随机变量） X 发送出 n 种信息，则该信息源的信息熵表示为：

$$H(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots) = \sum_{i=1}^n p(x_i) I(x_i) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \ln(p(x_i)) \quad (2-3)$$

其中， $p(x_i) \geq 0 \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \sum_{i=1}^n p(x_i) = 1$ 。根据熵的含义，随机变量的熵度量了其本身的不确定性程度，其熵越大，不确定性越大^[41]。

依据以上概率论和信息理论，本文在第三第四章中，将概率论不确定性分析方法结合到综合法中，将清单数据的数据质量转换成概率的问题，为之后的分析提供足够的数据，从而模拟总体不确定性的传播。

2.4.3 生命周期评价中的不确定性来源

由于生命周期评价模型分为四个步骤，因此不确定性应来源于四个方面：

（1）目的与范围确定：目标定义是否清楚；研究范围以及系统边界的确定；功能单位的选择；数据要求的说明；重要假设和限制。

（2）清单分析：数据来源、地域、时间限制；数据质量；分配原则的选择等，第三章会具体细化。

（3）影响评价：影响类型、类型参数、特征化模型的选择。

（4）结果解释：信息的识别和组织，问题的确定，评估。

2.4.4 生命周期评价中的不确定性分类

依据不确定性的定义，LCA 不确定性可以分为三大类：

（1）与随机性相关的不确定性，包括清单数据的测量，数据质量，分配规则、评价方法、模型的选择；

（2）与目标或定义的不清楚相关的不确定性，即在目的与系统边界的确定阶段由于定义的不清楚和不合理所导致的；

（3）模糊不确定性，主要为清单数据部分已知部分未知（或缺失）。

2.5 本章小结

本章对生命周期评价的概念进行了说明，着重介绍了 LCA 的特点，说明了 LCA 的框架，介绍了目前常用的 LCA 数据库与工具，详细阐述了 LCA 中的不确定性概念、理论、来源及其分类。

第三章 生命周期评价中清单数据的分类及质量评价

由第二章可知，产品生命周期评价中的不确定性来源和种类有很多。对生命周期清单进行不确定性分析的意义主要有以下几点：

(1) 生命周期清单包含的数据非常多，通过对清单不确定性进行量化分析可以识别不确定性源，继而进行敏感性分析有助于指导研究人员对清单的改进和数据收集工作：一方面针对结果不确定性较大的重要参数，需要收集更多、更具代表性的数据，以减少其对分析结果的影响；另一方面对结果影响小且较稳定的不重要参数可以忽略，由此节省大量的时间和精力解决主要问题。

(2) 通过不确定性分析对清单参数识别后，可以评估系统边界的确定是否合适，如去掉一些次要的生命周期阶段或工艺子系统，既可以扩展系统边界，又可将一些重要的单元过程包括进来。

(3) 可以通过不确定性分析结果指导简化模型中的假设，使模型更具代表性，为将来的研究分析提供更合理的模型或者框架，从而提高生命周期评价的可靠性。

由于清单分析是生命周期影响评价的基础也是评价的重要的步骤，清单的不确定性对评价结果的可靠性有很大的影响，因此对产品清单不确定性进行分析是非常必要的。

3.1 生命周期评价中清单的不确定性

3.1.1 清单不确定性的产生来源

LCI 是生命周期评价基本数据的一种表达方式，是进行生命周期影响评价的基础^[9]。然而，不确定性广泛存在于生命周期清单中，据调查结果显示，仅在一个温室气体排放清单中不确定性因素占到整体平均排放数据的 5%-20%，即使在一个数据质量较高的清单中，不确定性比例也会达到 4%^[36]。生命周期评价中清单不确定性的产生来源主要有数据来源、地域、时间限制，数据质量，分配原则的选择等，具体主要有以下几方面：

(1) 数据。由于数据的变动性引起的不确定性，如：用各种相似的锅炉发电甚至用同样的锅炉发电，但是随着时间和依赖条件的改变所得到的发电数据是不一样的；收集到的数据由于没有详细说明具体要求而导致的不确定性，如：用中国 2011 年的某一发电厂的数据来代替德国 2012 年某一发电厂得到的数据；数据不完整引起的不确定性，由于收集方式和难度使得收集到的数据不是完整的，在分析阶段用其它类似的数据来代替，甚至数据空白用假设的数据来代替；数据被四舍五入，如：0.453 可能会被取值为 0.5，产生的误差大于 10%。

(2) 选择。与目标和定义的系统边界不一致的选择，如：用某一过程的平均技术数据来代替最合适的可以获得的技术数据；选择的分配原则不一致，如：

不同的产品链选择不同的分配方法。

(3) 关系。错误的关系，如：酸化程度与 SO_2 排放量之间的线性关系可能无法反映真实的关系；表述的关系不完整，如：忽略了污染物背景值的影响，可能会建立错误的关系；通过软件建立的关系可能是不准确的，如：矩阵转置规则对算法的选择是敏感的。

3.1.2 清单不确定性的表达和传递

清单不确定性的表达方式主要有两种：一种是定性的表达，即，第三节中数据质量指标评价方法就是定性的表达方法之一，将参数不确定性各方面量化，用指标表示其值，其中根据数据质量的侧重点不同，数据指标的选取可能会各不相同；另一种是定量的统计的方法，通过确定每个参数的随机分布并通过模拟仿真来确定其不确定性的传播，并通过敏感性分析确定对结果不确定性影响较大的参数。

3.2 生命周期评价中清单数据的收集和分类

数据收集是清单分析的重要环节。做好数据收集的准备后，需要对清单数据进行收集。该过程需要收集大量的工艺数据，每一个工艺步骤的原材料使用量、产品、能量使用量、环境排放等都必须量化。一般情况下这些数据无法直接从文献中获得，必须由企业或产业部门提供。

3.2.1 清单数据分类

产品生命周期包括许多环节，因此涉及很多企业和经销商，它们的活动受各种条件的约束，如：国家环境法规、经济规律、技术条件以及资源供应情况等。这些活动主要包括：能源供应商向产品制造商提供能源（如电、煤、天然气等）；物料生产商向产品制造商提供资源（如：设备、原材料等）；产品制造商将原材料加工成产品，并排放出各种废料（三废、噪声等）；产品被消费者购买使用后，报废后的产品由回收企业回收处理及再利用。因此，产品生命周期涉及的数据很多，覆盖的行业和范围很广泛，依据其来源，本文将产品生命周期清单数据分为以下几类：

(1) 标准和法规数据。在产品生命周期中，有很多信息是由标准化机构统一制定和修改的，这些数据通常是公开的和公用的，往往是一段时间内的标准，具有相对稳定性。如：技术部门制定的关于产品技术的标准或规定、环保部门颁发的与环境协调性相关的环境法规和指令、与经济相关的各种标准和分析方法。

(2) 企业数据。产品生命周期中涉及各阶段企业的数据，这些数据可分为两类：第一类是企业自有数据和企业间共同数据，指企业自己常用的业务数据和专业知知识，这类数据与其他企业关联较小，企业之间数据彼此独立互不相干，如：制造商拥有的关于产品的制造工艺的专业参数只对制造商有用，而对使用

者毫无意义，因此可就地存放。第二类数据是指彼此之间有着紧密联系的数据，这类数据通常分布在不同的企业，但是彼此之间又很相关，如：某回收机构在回收产品或零件时，涉及到的关于该产品或零部件材料的回收性能、拆卸方法以及产品的使用情况的数据信息均分布在材料制造商、生产厂商和用户的数据库中，因此在产品生命周期分析中这类数据必须是企业间共同拥有的。

(3) 文献数据。在产品生命周期评价中，有一些数据是文献中提供的，而这些数据通常是公用的，如：国家能源部门提供的关于能源生产的具体参数包括能源转化比率，排放的各类环境污染气体数值等。

以上是从来源的角度对产品生命周期清单（LCI）数据进行的分类，但是由于生命周期的复杂性，表 3-1 从数据性质将其分类并将两种分类方法得到的数据之间的关系用该图表示。

表 3-1 清单数据分类

分类		
按来源	按性质	关系
标准和法规数据	公用数据	共用数据包含标准法规数据
企业数据	专有数据	专有数据包含部分企业数据
文献数据	共用数据	文献数据为共用数据

3.2.2 清单数据收集方法

由于产品生命周期清单数据跨越的企业很多：产品从生产阶段到报废后的回收处理阶段，这些数据分布在不同的企业和不同的地理位置，因此 LCI 数据的收集非常耗时，数据类型复杂且收集困难。目前数据收集方法主要有：

(1) 现有生命周期数据库和知识库。随着生命周期评价应用的越来越成熟，LCI 数据库的建立也越来越完善，国内外尤其是国外数据库也逐渐增多（见表 3-2）。这些数据库大致分为几类：

(1.1) 国家或地区的公开的数据库。这些数据库往往来源于公共的资助项目，为 LCA 提供多种产品或基础服务的清单数据，如：原材料获取、发电、运输、回收处理等。目前许多国家和地区正在研究和发展新的数据库，如巴西、加拿大、中国、德国、马来西亚、台湾等其他国家和地区。

(1.2) 企业数据库。作为 LCA/LCI 数据库的补充，世界各地很多大企业创建自己的数据库以便为本企业产品提供一手的工业数据。

(1.3) 一些数据库（如 Ecoinvent、US NREL 等）为建立不同的单元过程的清单而提供数据模型。这大类数据库的可靠性较高，可结合数据获取背景借鉴和采用。

表 3-2 国外已发布数据库

数据库名称	所在国家	发布时间
SPINE@CPM	瑞典	2007
PROBAS	德国	2007
JEMAI	日本	2004
NREL	美国	2004
LCI	澳大利亚	2007
Ecoinvent	瑞士	2007
European Reference Life Cycle Database(ELCD)	欧洲	2007

(2) 自行收集的数据。依据产品或服务的生命周期，结合所研究的对象和目标，自行收集数据，建立与研究对象相对应的产品数据库。如：向材料制造商获取原材料和材料生产阶段的数据；向产品生产商获取产品设计和制造阶段的数据；向生产商、运输单位收集运输阶段的信息；来自使用者、维修企业（或企业维修部门）的产品使用阶段的数据等。在确定生命周期研究范围时，需要对产品功能进行清楚的定义，由此衍生出功能单位的概念。在上一章中本文详细介绍了功能单元的概念和划分依据。

(3) 其它数据。主要包括文献数据和非报告性数据：许多专著、研究报告和论文，都会包含一些数据和方法来证明观点或研究论点，这些数据和方法也是 LCA 研究重要数据的来源之一；非报告性数据通常来源于生产商、政府和研究机构、实验室，这部分数据通常较分散、且没有公开发布，通常较难获取。

3.3 生命周期评价中清单数据的质量评价

广义清单数据质量的一个重要方面是数据的可获取性，生命周期评价主要涉及环境影响数据，因此分析数据采集和计算过程的首要步骤是了解我国相关企业的基本环境统计制度。

我国环境统计指标体系的形成和具体内容是根据我国客观环境现象所决定的，其中与产品环境生态性评价相关的主要指标类别为“工业污染与处理”，与生命周期清单直接相关的类别为工业企业污染物排放情况和工业污染处理设施情况这两项。目前，我国主要的环境统计制度是采用环境统计报表制度来收集相关数据，这些数据反映环境状况、污染防治和生态保护等方面。该制度分为综合年报制度和专业年报制度，综合年报制度是通过统计我国环境污染物排放的工业企业排放的污染物的种类、数量及所在区域、流域和主要行业的分布情况及其污染治理的状况，为监督各地区排放污染物总量控制计划的完成情况，为各级政府和环境行政主管部门制定环境保护政策和法规，实施主要污染物排放总量的控制，加强环境监督管理获取环境信息，提供环境统计资料。企业也是根据该制度对自身产品进行生命周期评价，有些企业甚至会制定对自身产品

更严格的环境管理制度和更详细的环境监测类型。

数据质量在很大程度上决定了生命周期评价（LCA）结果的可靠性。随着 LCA 方法应用的增加，对 LCA 结果可靠性的要求也越来越高，因此面临的一个任务是数据质量及其不确定性的评价^{[12]-[15]}。国内外学者已注意到了这个问题，并提出了一些解决方法^{[17]-[22]}，但并未形成一致的看法，生命周期清单数据质量评估的方法仍然是目前国内外研究的热点。因此，分析清单不确定性首先要分析和量化数据质量。数据质量的表达方法应通过数据收集与合并的方法根据各方面的数据质量要求定性、定量评估。

3.3.1 清单数据质量目标

数据质量目标（Data quality goals, DQG）概念最先由 Weidema BP 和 Wesnaes MS^[42]提出，是依据研究对象所需求数据特点的具体化的数据目标。在 LCA 目标和边界确定阶段就需确定数据质量目标，通过 DQGS 的确定就可以指导数据的收集。由于数据的关联性和合理性最终决定数据的质量，因此数据质量目标应当根据具体的研究目标来确定。依据 ISO 标准^[43]数据质量要求应当包含以下几方面的内容：

（1）产品系统：产品系统不能仅从最终产品的角度来阐述，因为它的基本性质取决于它的功能。产品系统是由提供一种或多种确定功能的中间产品流联系起来的单元过程的集合，通过物质与能量的利用与循环，为人类提供产品或服务。它由系统内部与系统环境组成。系统环境包括产品系统原料与能源的来源和其产品与排放物的汇集。产品系统主要包括产品单元过程、通过系统边界的基本流和产品流以及系统内部的中间产品流^[38]。

（2）数据质量：数据在满足研究所申明的要求方面的能力特性。

（3）数据质量要求：表述数据质量要求使研究结果的可靠性被客观认识，以及研究结果被合理解释都是非常重要的。应详细说明数据的来源，如实测数据和文献数据的来源应明确具体，实测数据应是能反映系统中的主要能量流和物质流，且应具有一定的代表性，能代表所研究的技术过程应当满足的参数。因此，对数据质量必须给出规定的目标以满足研究目的与范围。

应包括以下方面的内容要求：

（3.1）时间跨度：所需数据年限（如最近 4 年内）和从中收集数据的最短时间(如一年)；

（3.2）地域范围：为满足研究目的，从中收集单元过程数据的地理覆盖面（如局地、区域、国家、洲、全球）；

（3.3）技术覆盖面：所需数据来源于研究目标所在企业的相关研究工艺。主要有几种技术组合：实际工艺组合（来源于所研究产品的工艺或材料数据）、最佳可行技术（同类产品或相似产品的相似工艺数据）、最差作业单元的加权平均（相关性不大的工艺或材料数据的加权平均）；

此外，还必须考虑决定数据属性的其他因素，如它们是从特定现场还是从文献中收集来的，是否应进行测量、计算或估算等。

对经过敏感性分析确认的贡献大的部分物流和能流的系统单元过程，应采用从特定现场取得的数据，或有代表性的平均值数据。产生环境影响排放物的单元过程，也应采用从特定现场取得的数据。

在所有数据质量研究中，都必须进一步考虑下列数据的质量要求，其详略程度取决于研究目的与范围。

(3.4) 准确性：测算每种数据类型中数值的变化程度（如方差）；

(3.5) 覆盖率：一个单元过程中，即对每一数据类型报送基本数据的地点数占实际存在的地点总数的比率；

(3.6) 代表性：所采用的数据是否能够比较准确的反应系统的特征，对数据集反映实际关注群（即地域广度、时间跨度、技术覆盖面）的定性评估；

(3.7) 一致性：对待不同的研究目标和分析内容，所用的研究方法的统一程度的定性评估。

(3.8) 可重复性：即其他从事生命周期评价工作的研究者或机构可否根据所报告的数据和方法得出相同的研究成果的可能性的定性评估。

当研究是用于支持面向公众的对比论断时，研究中必须规定上述各方面的全部数据质量要求。

(4) 数据质量的表征方法：数据质量评价是根据数据质量的各个方面的要求，对其做出定性或定量的评估的过程。应通过定性、定量及数据收集与合并方法来表征质量。

(5) 不确定性分析：用来评估与量化由于输入的不确定性和累积的数据变化给生命周期清单带来的不确定性的系统化程序。

(6) 敏感性分析：用来估计研究结果所选用的评价方法、模型和数据影响程度的分析；生命周期评价是一个不断反复的过程，必须根据由敏感性分析所判定的数据重要性来决定数据的取舍，从而对输入输出初步选择的准则加以验证。

依据研究目标与范围对 LCI 的分析结果加以解释。结果解释中必须包含对数据质量的评价和对重要输入输出及方法模型选用的敏感性分析，以评估结果的不确定性。对于 LCI 分析中的不确定性分析技术目前仍处于初步发展阶段，但是利用它所分析的概率随机分布有助于 LCI 结果和结论中的不确定性评估。

3.3.2 清单数据质量指标

通过对数据质量进行评估可以进行数据的不确定性评估。数据质量指标（Data quality indicators, DQI）可以用来评价数据质量，通过定性或定量的方法将生命周期清单数据质量与数据质量目标相关联起来。依据 ISO 标准^[43] DQI 应包含以下几方面的内容：精确度、偏差、完整性、数据分布、不确定性、适

用性、一致性、异常现象的识别、专家评审、数据收集方法与限制。

本文从代表性、准确性、时间、地理、技术 5 个指标来进行评估。根据各个指标的要求，将各个指标质量划分为 5 个不同的等级，根据清单数据的具体情况打分，最后通过各个数据的各指标得分情况得出数据质量评估结果(见表 3-3)，且假设各指标相互独立。其中数据时间、来源、技术相关性为普遍选取的指标。该方法在实际案例分析中具有一定的应用价值，且易于操作。例如在发电厂 LCA 数据质量评价方法应用^[17]中，基于该方法在数据采集时可以筛选出哪些数据来源于公开数据库，可信度比较高；哪些数据不够完整或完整性较差，从文献中无法断定其代表性；哪些数据缺乏，属于估计或替代值。根据这些数据的背景通过数据质量评价，可以初步确定参数的可靠性，从而指导生命周期评价中数据收集方案的改进。

选取指标虽有异同，但最终通过比较各个参数指标综合得分，可以很方便的发现数据质量指标存在的问题以及其可靠性的大小，但该方法的不足在于无法评估 LCI 总体质量对结果的不确定性。另外该方法还存在一定的主观性，评分的合理与否还依赖于研究者或评分专家的专业知识，因此需结合其它的方法来进行评估。

表 3-3 数据质量指标矩阵

指标值	1	2	3	4	5
代表性	与研究目标符合的充足的样本、平缓正常波动	数据来自稍小范围但与研究目标符合	数据来自更小范围但与研究目标符合	数据来自小范围但与研究目标有所不符	来自小范围但与研究目标基本不符合
准确性	根据合适的方法测量、校验得到	部分根据假设的校验数据或依据测量的非校验数据	部分根据假设的非校验数据	量化估计	非量化估计
时间相关性	研究目标当年数据	与研究目标当年相差 3 年以内	与研究目标当年相差 3-8 年	与研究目标当年相差 8-18 年	与研究目标当年相差 18 年以上或未知的数据年代
技术相关性	从研究的企业得到的相应的工艺过程和材料数据	从不同的企业但是与研究目标相同的工艺过程和材料数据	来自不同技术但与研究目标相同或类似的过程和材料数据	来自相同的技术但与研究目标相关的过程和材料数据	来自不同技术但与研究目标相关的过程和材料数据
地理相关性	研究目标区域	与研究目标区域地理条件大部分相同	与研究目标区域地理条件类似	与研究目标区域地理条件部分类似	与研究目标区域地理条件完全不同或未知地理条件

3.3.3 数据处理

在清单数据的收集过程中必须检验清单数据的有效性，通常通过物质和能量平衡进行排放因子的比较分析来确认有效性。若检验过程中发现明显不合

理的数据就要予以替换或删除。用来替换的数据必须满足规定的

清单数据质量是相对而言的，在 LCA 研究中，通常会遇到数据质量问题。数据问题主要有：数据不精确，数据缺失，数据没有代表性（见图 3-1）。

（1）数据不精确。主要存在以下两种情况：

（1.1）数据精确与否与选择获得参数值的测量方法的准确性相关。

（1.2）测量导致的是随机误差，这种误差来源于选择的测量工具的不合格、观察技术的不合理或者来源于数据收集或测量过程的固有的缺陷或偏差系统的误差。针对此两种误差，采用的解决方法是测量者或实验者在试验测量过程中应尽量选择合理的测量试验方法，并经过专家推荐或评审，针对随机误差和系统误差，在后面的分析中会详细说明其方法。

（2）数据缺失。缺少部分参数值，导致模型出现数据空白。

（3）数据缺乏代表性。当数据出现空白或缺失时，可用非代表性数据来替代，或者用相似技术过程的数据来替代典型数据，但是其缺点是缺乏技术代表性、时间代表性或地理代表性。

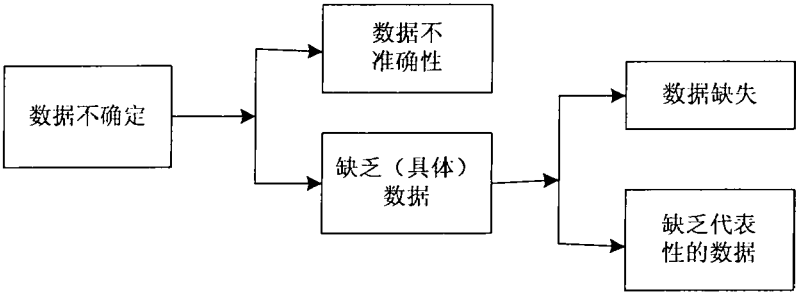


图 3-1 不确定数据类型

3.4 本章小结

本章分析了生命周期评价中清单不确定性的来源、表达和传递。将清单数据分为 3 类，并提出合适的收集方法。针对数据质量要求，依据 ISO 标准提出了数据质量指标矩阵，并对不同的数据如不准确、缺失、缺乏代表性提出了相应的解决方法。为下一章不确定性方法的开展垫好了铺垫。

第四章 清单数据不确定性及敏感性分析方法

LCA 是一个不断重复与反复进行的过程,随着数据的积累和研究的深入,可能带来的不确定性就越大,应考虑因此而带来的不确定性,本章提出将随机分布方法和回归分析理论相结合的综合方法来分析生命周期评价中清单的不确定性分析。

4.1 清单不确定性分析方法及框架

LCI 的不确定性分析通常分为两步。首先,对不确定参数进行评估,即对不确定性参数进行评估,并量化其不确定性的。然后通过不确定性重要性分析或敏感性分析得到不确定性参数对结果影响的贡献率,进而得到关于不确定性的综合分析结果。

4.1.1 不确定性分析

目前,生命周期清单数据不确定性评价方法主要有三种:

(1) 半定量的方法,如第三章所提到的数据质量方法,采用数据完整性、技术相关性、地理和时间代表性等指标来表示数据的质量^[31],该方法的优点是操作性比较强,且方法相对比较简单,对初步确定数据质量有很好的应用价值,但是该方法的缺点在于对参数数据质量总体的不确定无法评估。

(2) 定量方法,即利用输入参数的可变信息通过不确定性传播获得输出参数的一定累计的不确定性信息。目前已经提出的不确定性传播的分析方法有:模糊逻辑模拟方法,贝叶斯统计方法,蒙特卡罗模拟。利用蒙特卡罗随机模拟来计算分析参数对结果影响的总的不确定性^[10],该方法是一种不确定性随机模拟方法,并得到广泛的应用。该方法的优点在于其灵活性较强,能反映参数对总体的不确定性,但其缺点在于未能考虑生命周期清单数据质量的具体特征。

(3) 综合法,即蒙特卡罗方法与其他方法结合使用,如蒙特卡罗方法与贝叶斯定律的结合^[20];将数据质量指标方法与蒙特卡罗结合的方法^[11],该方法的优点是既考虑了数据质量的具体特征又考虑了数据质量对结果的总体不确定性,但缺点有:无法评估各清单参数与总体不确定性的关系并量化体现;无法评估量化对不确定性贡献较大的清单参数;没有详细深入其应用。

4.1.2 清单不确定性分析框架

本文将清单不确定性分析分为三步,首先,对输入参数进行评估,即对不确定性参数进行识别,并采取第二章提到的相应的数据处理方法,然后对参数质量进行评估打分即用数据质量指标的方法量化其值;其次,结合概率分布的知识,将综合数据质量指标值转化为每个参数的概率分布,该步骤在下一节将会详细说明;最后,通过确定的每个参数的概率分布获得所需的足够的数据,并结合回归分析理论,对各参数总体对评价结果的总的不确定性进行评估,并通

过不确定性重要性分析，评估得出对结果贡献率较大的参数，即敏感性分析，从而确定对结果较敏感的因素。以上为本文生命周期评价清单不确定分析的步骤，具体框架见图 4-1。

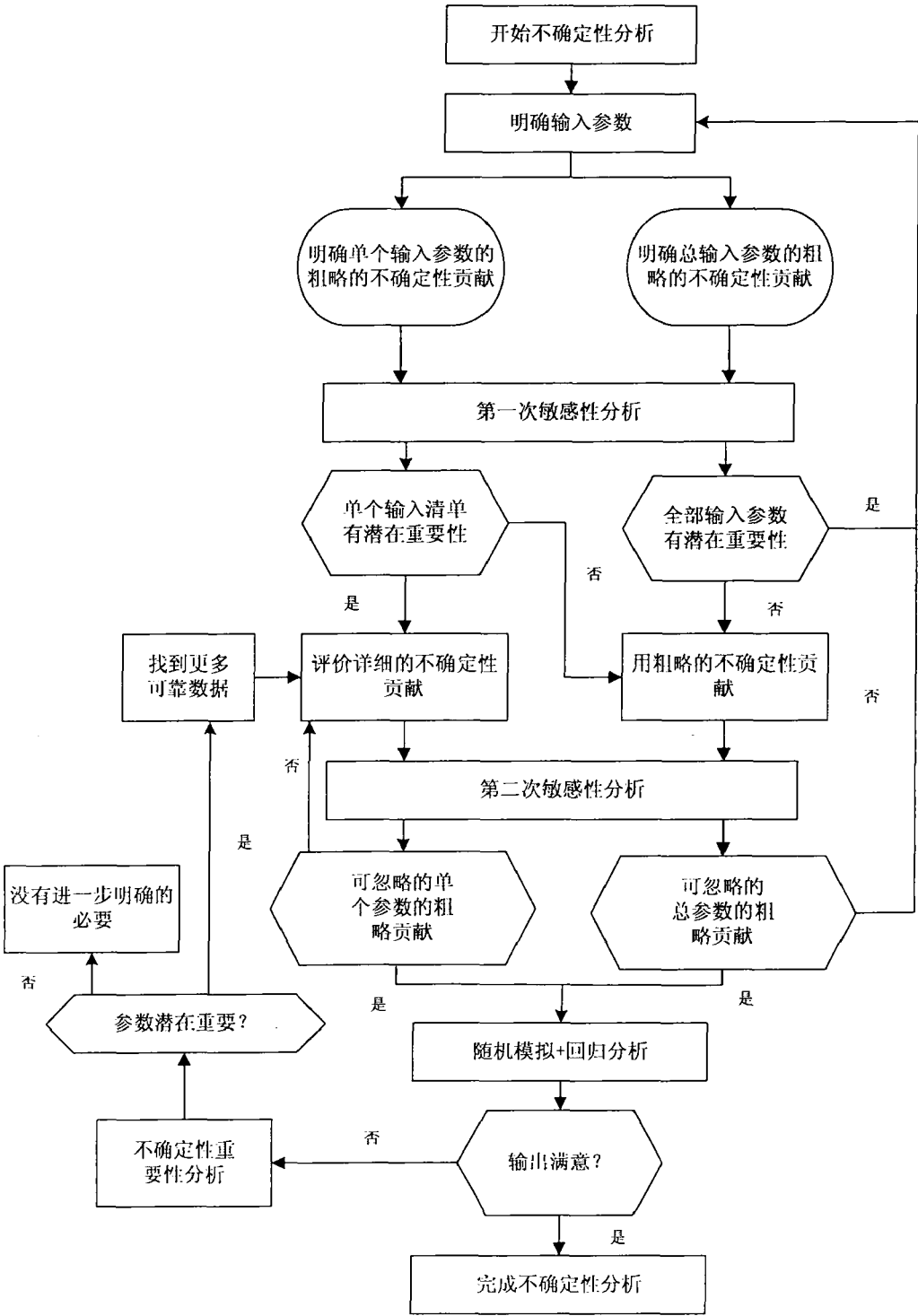


图 4-1 生命周期清单不确定性分析框架

由图 4-1 可以看出，当确定输入参数时，先对其进行初步的不确定性分析，即可以用操作简单的 DQI 方法来进行评估，通过初步的筛选，确定单个输入参数或者各不确定性参数总体对评价结果重要性影响程度，通过第一次敏感性分

析筛选对结果影响较小的参数；若单个参数不确定性对结果有重要的影响，则将其对结果的不确定性的的重要性进行第二次敏感性分析，若单个参数对评价结果影响是非敏感因素，则考虑对参数总体对评价结果不确定性重要性进行评估，如果参数总体对结果不确定性贡献率较大则进入下一步的随机模拟，否则进行总体参数的第二次敏感性分析。

4.2 清单不确定性分析方法

4.2.1 清单参数概率分布

（1）综合数据质量指标值

当对清单数据质量各方面进行打分后，为了能综合反映参数数据质量，将第三章中所讨论的数据质量指标向量转化为一个综合的数据质量指标值，引入参数 P 表示数据质量在其总质量中所能达到的范围，计算公式如式（4-1）所示：

$$P = \frac{\sum \text{数据各质量指标分数值} - \sum \text{数据各质量指标最小分数值}}{\sum \text{数据质量指标分数最大值} - \sum \text{数据各质量指标最小分数值}} \times 100\% \quad (4-1)$$

用一个例子说明一下：如一个数据的质量指标值为 (1,1,2,3,1)，那么它的 p 值就等于 $[(8-5)/(25-5)] \times 100\% = 15\%$ 。

（2）随机分布的建立

由于清单集中数据大部分为统计数据，因此可以用相应的统计方法处理。由上面提到的清单数据质量范围，由于参数 P 的取值范围在 (0,1) 之间，因此，可以用概率统计分布来模拟评估不确定性的传播。一旦清单输入数据的综合质量指标值确定后，每一个数据可以根据一个代表性概率分布转换为随机变量。

当数据收集受到一定程度的限制，如数据统计样本不足，或者数据部分缺失则依据经验法则^{[44][27]}来确定参数范围。因此，依据平均值、最大最小值、或者一个确定的置信区间如 95% 就可以确定每个参数的概率分布。可应用的概率分布函数很多，通常使用的有三角分布、标准正态分布、对数正态分布等。由于 β 分布的概率密度函数公式包括 2 个端点参数 A 和 B 及 2 个形状参数 α 和 β ，形状参数和端点范围的可选择性使得 β 分布可以近似的模拟任何形状分布，如正态、均匀和指数分布等^[45]。形状参数决定了概率出现的位置，而端点则限定了可能的取值范围。因此在实际概率分布和相关参数未知的情况下，最适合采用的是 β 分布，分布表如表 4-1 所示。

从表 4-1 可以看出，将参数 p 的取值划分为 9 个等级，分别对不同的等级给与相应的综合质量指标值， p 值越小就说明数据质量越好，因此得到的相应的综合质量指标值也较小，参数对应的变化范围就相应较小。

从图 4-2 可以看出，随着形状参数的增大，图形变陡峭，对每一次 LCA 随机模拟输入数据而言，靠近端点的值发生的概率增大，表明数据的质量在下降。同时，端点范围的增大也表明数据具有较高的不确定性，这是因为输入数据的

表 4-1 综合数据质量指标概率分布表

质量值所占百分 数(p)	综合数据 质量指标 值	形状参数		变化范围(%)	
		α	β	A	B
$0 \leq P < 12.5$	1	5	5	-10	+10
$12.5 \leq P < 25$	1.5	4	4	-15	+15
$25 \leq P < 37.5$	2	3	3	-20	+20
$37.5 \leq P < 50$	2.5	2	2	-25	+25
$50 \leq P < 62.5$	3	2	2	-30	+30
$62.5 \leq P < 75$	3.5	2	2	-35	+35
$75 \leq P < 87.5$	4	1	1	-40	+40
$87.5 \leq P < 100$	4.5	1	1	-45	+45
100	5	1	1	-50	+50

值可能分布在更宽的区域。

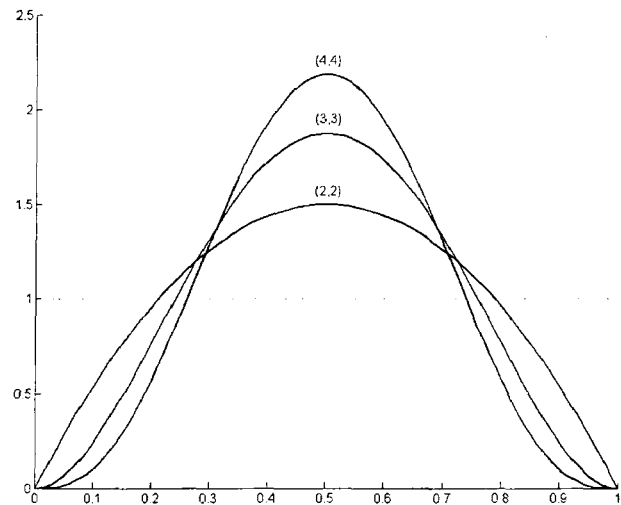


图 4-2 不同形状参数 α 和 β 的 β 分布概率密度函数

4.2.2 多元线性回归分析清单不确定性

回归分析（regression analysis）是确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法。回归分析是目前应用极其广泛的数据分析方法之一。它既可以用于探索和检验自变量和因变量之间的因果关系，也可以基于自变量的取值变化来预测因变量的取值，还可以用于描述自变量和因变量之间的关系。多元线性回归分析方法适用于分析一个因变量和多个自变量之间的关系^[46]。能够用来预测当自变量变化时，因变量是如何变化的，同时也能给出预

测的精度。关于回归模型的参数估计、假设检验和回归方程选取方法等方面的理论都已较为成熟。本文通过确定环境影响与各输入清单的线性关系，并通过参数估计和假设检验来评估各清单对结果的不确定性及敏感性。

(1) 原理

设 Y 是一个可观测的随机变量，它受到 $p-1$ 个非随机因素 $X_1, X_2, \dots, X_{p-1}$ 和随机误差 ε 的影响，若 Y 与 $X_1, X_2, \dots, X_{p-1}$ 有如下线性关系：

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i \tag{4-2}$$

式中： $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ ， ----未知参数；

ε_i ----均值为零、方差为 $\sigma^2 > 0$ 的不可观测的随机变量，称为随机误差项。

这里， Y_i 表示个体 i ($i=1,2,\dots,n$) 在因变量 Y 中的取值， β_0 为截距的总体参数， $\beta_1, \dots, \beta_{p-1}$ 为斜率的总体参数。由于该回归模型包含多个自变量，因此将式(4-1)称作多元回归模型。定义以下矩阵：

$$Y_{n \times 1} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_i \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \qquad X_{n \times p} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1,p-1} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & X_{i1} & X_{i2} & \cdots & X_{i,p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{n,p-1} \end{bmatrix}$$

$$\beta_{p \times 1} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \\ \vdots \\ \beta_{p-1} \end{bmatrix} \qquad \varepsilon_{n \times 1} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_i \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

那么，采用矩阵形式，一般线性回归模型(4-1)就可以表示为：

$$Y_{n \times 1} = X_{n \times p} \beta_{p \times 1} + \varepsilon_{n \times 1} \tag{4-3}$$

该式也常常简记为：

$$Y = X\beta + \varepsilon \tag{4-4}$$

这里， Y 表示因变量的向量， β 表示总体参数的向量， X 表示由所有自变量和一系列常数 1 所组成的矩阵， ε 则表示随机误差变量的向量。假定

$$\begin{cases} \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2), i=1,2,\dots,n \\ Cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0, i \neq j \\ \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n \text{相互独立} \end{cases}$$

由上述假定可知，该模型称为正态多元线性回归模型。

(2) β 、 ε 参数估计

通常采用最小二乘法 (ordinary least squares: OLS) 估计参数 β 、 ε 的值, 利用方差分析表计算得到的统计检验线性回归关系的显著性和参数的显著性。记数据总的离差平方和 (total sum of squares), 残差平方和 (error sum of squares) 和回归平方和 (regression sum of squares) 分别为:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \quad SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4-5)$$

定义因变量与多个自变量的测定系数 R^2 和修正的测定系数 R_a^2 为:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad R_a^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSE}{SST} \quad (4-6)$$

使用测定系数 R^2 为判断分析拟合优度, 对拟合的模型还需进行残差分析与共线性分析, 分析模型的适用程度。

如果选择的回归自变量对因变量 y 不是有显著影响, 则自变量要进行适当的筛选和剔除, 从而避免对模型的干扰, 逐步回归分析方法是一种选择模型自变量的常用统计方法, 其基本思想是有进有出, 具体步骤是将变量一个一个引入, 当每引入一个自变量后, 对已选入的变量进行逐个检验, 当原引入的变量由于后面变量的引入而变得不显著时, 要将其剔除。每增加一个或剔除一个变量时都要对其进行 F 检验, 以确保每次引入新的变量之前回归方程中只包含显著的变量。这个过程反复进行, 直到所引入的变量都是显著的, 所有剔除的都是不显著的因素。

依据公式(4-1) Y 的不确定性可以用式 (4-7) 表示:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n \beta_i \Delta X_i \quad (4-7)$$

标准化回归系数用公式 (4-8) 表示。在多元回归分析中,

$$\beta_i^* = \beta_i \frac{\delta(X_i)}{\delta(Y)} \quad (4-8)$$

$\delta()$ 这里是标准差。

4.3 清单敏感性分析

通过清单不确定性的评估, 对不确定性因素进行量化后, 进一步识别各参数对分析结果的影响程度也是非常重要和有意义的。不确定性重要性分析即敏感性分析是解决这一问题的主要方法。

4.3.1 敏感性分析

(1) 敏感性分析定义

敏感性分析 (Sensitivity Analysis) 是一种定量描述模型输出因素受输入因素影响性程度的方法。如假设模型表示为 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (x_i 为模型的第 i 个影响因素), 在某一基准值 $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 下, 模型输出为 y^* 。分别令每个因素

在可能的取值范围内变动，分析由于这些因素的变动，模型输出 y 偏离基准输出 y^* 的趋势和程度，这种分析方法叫做敏感性分析^{[47][48]}。

(2) 敏感性分析方法

1) 常规敏感性分析方法

对于输入输出函数关系已经确认的或线性关系较明显的情况，分析输入参数的敏感性时，文献[47]提出敏感度因子来计算：

$$p(\chi_i) = \max \left\{ \left| \frac{y^* - y_{x_{\max}}}{y^*} \right|, \left| \frac{y^* - y_{x_{\min}}}{y^*} \right| \right\} \quad (4-9)$$

式中 $p(\chi_i)$ 为输入参数 χ_i 的敏感度； y^* 为基准输入属性集所对应的某类环境影响变化量； $|y^* - y_{x_{\max}}|$ ， $|y^* - y_{x_{\min}}|$ 分别计算的是某类环境影响 y_j 在输入属性 χ_i 的变化范围之内的最小值和最大值。

2) 基于神经网络的敏感性分析方法

神经网络敏感性分析方法又分为局部和全局的敏感性分析方法。局部敏感性分析中 Garson 算法是较早提出的较成熟的方法之一。Garson 算法^[49]是一种借助神经网络获得的连接权值所做的敏感性分析方法。该方法用连接权值的乘积来计算输入变量对输出变量的影响程度或相对贡献值，输入变量 χ_i 对输出变量 y_k 的影响程度为：

$$Q_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^L \left(w_{ij} v_{jk} g / \sum_{r=1}^N w_{rj} \right)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L \left(w_{ij} v_{jk} / \sum_{r=1}^N w_{rj} \right)} \quad (4-10)$$

($i = 1, \dots, N, k = 1, \dots, M$)

假设神经网络为一个三层前向网络，输入层、隐含层、输出层神经元个数分别为 N, L, M ， $(\chi_1, \dots, \chi_N)$ 为输入变量， $(y_1, \dots, y_M)$ 为输出变量， $w = (w_{ij})_{N \times L}$ 为输入层与隐含层间连接权重， $v = (v_{jk})_{L \times M}$ 为隐含层与输出层间的连接权重。

3) 基于数理统计的敏感性分析方法

基于数理统计的敏感性分析方法也有很多，包括回归分析，方差分解法等。本文采用回归分析来进行不确定性敏感性分析，因此重点介绍此方法。

回归分析是基于数理统计的研究输入与输出之间的非确定关系，该法通常使用抽样仿真的得到的数据来拟合模型输入输出的关系，并根据拟合的结果和过程来评估输入参数的敏感性^{[49][50]}。该方法对于分析具有线性关系的模型十分有效。

最基本参数估计方法是最小二成估计法。由于回归模型中回归系数是随机抽样的数据估计，因此回归系数本身也是随机变量。如回归系数近似为零，则该系数所对应的输入与输出不存在显著的线性关系。回归分析中以回归系数、回归系数标准差、显著性水平作为 T 检验的输入，根据检验结果确定回归系数的显著性。输入或回归系数经标准化后，根据回归系数的显著性检验值，实现

对输入参数的敏感性排序。回归分析的优点在于：①能进行全局敏感性分析，即在所有输入参数同时影响输出的情况下，进行单个输入参数的敏感性分析；②能描述输入输出之间的关系；③对于非线性模型，可采用等级变化回归、Logistic 回归等方法。

4.3.2 不确定性敏感性分析

本文结合数据质量方法和回归分析方法对生命周期清单不确定性进行分析，因此对不确定性进行敏感性分析时，引入偏回归平方和，并通过对回归模型变量的偏回归平方和的评估分析各要素的敏感性。

在上一节建立的多元线性回归模型中，回归平方和 SSR 反映了所有回归自变量 $X_1, X_2, \dots, X_i$ 对回归因变量 Y 的总影响，当多元回归模型中取消一个自变量 X_i 后，回归平方和减少的部分，称为这个自变量 X_i 对 Y 的偏回归平方和 Q_i ，即这个自变量 X_i 对 Y 的回归贡献。用偏回归平方和来表示输入清单数据的相对重要性和敏感性。

对于每个清单数据 X_i 在多元回归中所起的作用大小，可通过相应 X_i 的偏回归平方和 Q_i 来衡量。 Q_i 表明对 Y 的回归贡献。 Q_i 越大，表示相应的 X_i 在回归中对 Y 的作用越大；当 Q_i 很小时，表示相应的 X_i 在回归中所起的作用越小。总偏回归平方和 ($Q_i = \sum Q_i$) 表示全部 Q_i 之和，比较每个 Q_i 与 Q_i 之比 S_i ($Q_i / Q_i, S_i \in [0,1]$) 值的大小，即可得出各清单数据的相对重要性和敏感性。

$$SST = SSR + SSE \tag{4-9}$$

$$Q_i = \Delta SSR_i = SSR - SSR_i \tag{4-10}$$

式中， SSE 为 Y 对自变量 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 线性回归的残差平方和， SSR 为回归平方和， Q_i 为剔除掉 X_i 后，用 Y 对其余 $p-1$ 个自变量作回归得到的回归平方和与剔除前的回归平方和所作得的差值，即 X_i 对回归的贡献。

4.4 本章小结

本章介绍了清单不确定性分析及其分析框架，提出了结合数据质量方法与回归分析结合的综合法分析生命周期评价中的清单不确定性。该方法不但考虑了清单数据质量并且考虑了清单数据总体对结果的总的不确定性，并给出了详细的步骤和方法，通过敏感性分析，评估对最终结果影响较大较为显著的因素，从而指导 LCA 研究者更加合理的进行评价，并提高了 LCA 研究结果的可靠性。

第五章 实例与应用研究

据调查,洗碗机在发达国家普及率已高达 70%以上,我国洗碗机制造企业将国外洗碗机市场视为主要市场。某公司是国内主要洗碗机生产厂家中产量较大的一家。2007 年产量达到 109.88 万台。洗碗机产品在国内销量较小,主要以出口为主。目前我国家电产品生命周期评价的研究越来越多,但是考虑其不确定性的研究不多。随着我国家电行业的迅速发展,生命周期评价方法应用到家电产品的研究也越来越成熟。由于我国洗碗机的生产研究技术发展还处于起步阶段,产品在国内普及率较低,国内各大洗碗机厂商均以出口为主,因此,本文结合国家课题研究项目,评估洗碗机的生命周期评价中清单的不确定性。

5.1 洗碗机清单数据质量评价

选择国内某家电企业的柜式洗碗机为研究对象,整机可分为电器控制和机械结构两部分。电器控制部分实现整机各种功能的控制。机械结构部分包括结构性零件及功能性零件。该洗碗机主要由水杯、内胆、呼吸器、软水器、程控器、喷臂、温控器及温度保护器、压力开关以及排水泵等组成。其外观如图 5-1 所示。

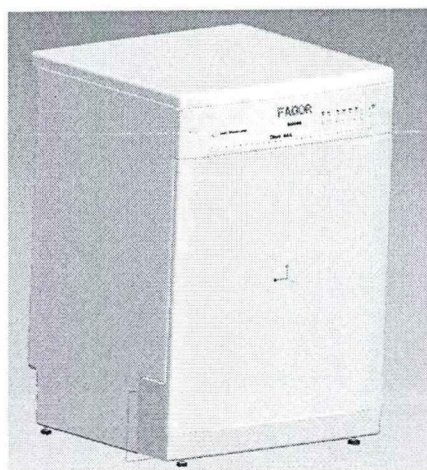


图 5-1 柜式洗碗机外观图

5.1.1 洗碗机生命周期评价输入清单来源

依据评价目的与研究目标,确定洗碗机系统边界,将洗碗机全生命周期分为 4 个阶段:原材料获取阶段、洗碗机制造阶段、洗碗机使用和维护阶段、洗碗机废弃与回收阶段。洗碗机销售阶段的数据难以收集或无可靠来源,不予考虑。本研究评价的功能单元为每次洗涤循环耗水量为 13.8L,耗电量为 0.822kWh,洗涤容量为 8 套的柜式洗碗机。其待机功率为 2.45W,关机能耗 0.3W。

由于生命周期评价的复杂性,日前大量地研究还主要局限于各行业的专家和研究人员。因此、所采用的分析软件也多为比较昂贵的商用软件,本研究采

用的模型为 GaBi4，该模型由德国斯图加特大学 IKP 研究所开发它包括非常详细的工艺与产品清单分析数据库和系统连接模块，使用户可以自己建立所研究产品的工艺链，进而分析物流和能流。

根据定义的系统边界，数据收集的类型主要涉及原材料获取阶段，洗碗机钣金件生产及装配阶段、洗碗机使用阶段、洗碗机的拆卸及回收四个生命周期阶段。能源数据直接来源于 Gabi 软件专业数据库；原材料生产数据来源于公开的研究文献；加工制造工艺数据（如冲压、折弯、等）均来源于生产厂商。

5.1.2 洗碗机清单数据分类

(1) 原材料获取阶段

收集洗碗机产品所需的原材料，数据如表 5-1 所示：

表 5-1 洗碗机材料清单表

材料类型	材料	DW 8ps (kg)
黑色金属	不锈钢	15.4
	铁	7.3
	钢板	5.8
	冷轧钢板	4.8
黑色金属		33.3
非黑色金属	铜	1.3
非黑色金属		1.3
塑料	ABS	0.45
	PA66	0.03
	丁苯橡胶	0.02
	PP	1.4
	PVC	0.02
	POM	0.3
		2.22
包装	硬纸板	0.13
	EPS	0.65
	纸	0.05
包装		0.83
总计		37.65

(2) 制造加工阶段：

制造加工阶段，该公司仅做内胆、横档、底盖、外壳、内门等钣金件的加工，其他零部件均为采购，故仅对这些钣金件的加工过程进行数据收集，如表 5-2 所示，其他零部件加工过程的数据均采用相关公开文件及数据库。

表 5-2 洗碗机制造加工输入清单

零件名称	输入	
内胆	电	0.4kwh
	不锈钢	10.34kg
	铁	1.54kg
横档	电	0.45kwh
	钢板	2.80 kg
	冷轧钢板	1.80 kg
底盖	电	0.2kwh
	铁	1.28 kg
外壳	电	1.65kwh
	不锈钢	4.0 kg
	聚丙烯	1.15 kg
内门	电	0.3kwh
	不锈钢	6.0 kg
	丁苯橡胶	0.0.17 kg

(3) 装配阶段：

装配阶段的过程如图 5-2 所示，整个装配过程耗能为 1.317kwh，排出废热 4741.2kJ。

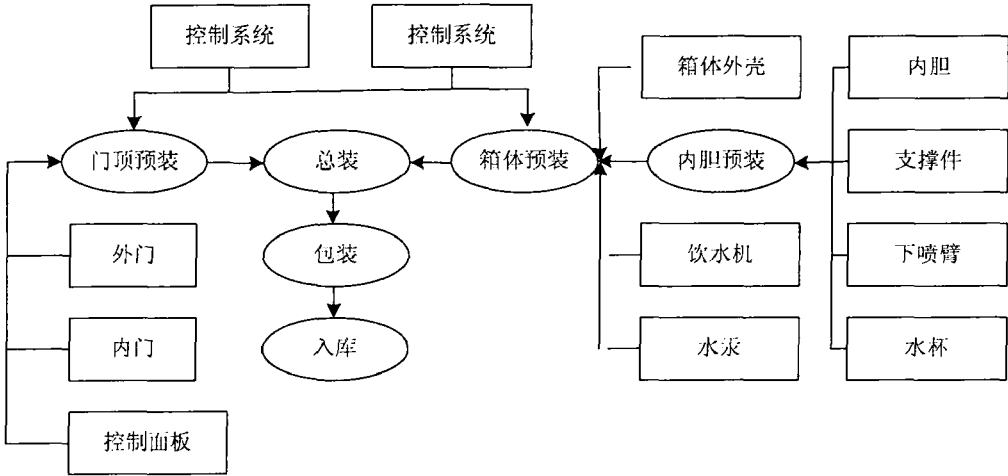


图 5-2 洗碗机装配过程

(4) 使用阶段：

该目标产品使用阶段，每次标准循环耗电量为 0.822kWh，待机功率 2.45W，关机功率 0.3W，洗涤时间为 160 分钟，耗水量为 13.8L，按每天使用一次，一年平均使用次数为 280 次，使用寿命为 15 年。统计数据归纳如表 5-3 所示：

表 5-3 使用阶段输入输出表

输入	参数
电	3617.4kWh
水	57960L

(5) 回收阶段

回收阶段拆卸均采用手动拆卸，故拆卸能耗视作 0，金属类零部件回收类型为材料回收，塑料及木质类零部件回收类型均按焚烧或填埋的处理方式。

表 5-4 回收阶段输入数据

输入	参数
ABS	0.45
纸	0.13
PP/EPDM	2.4
钢	33.25
PA	0.06
PVC	0.02

5.1.3 洗碗机清单数据质量评价

由于输入清单包括材料的消耗和能源的消耗，因此，可以将洗碗机生命周期各阶段的清单综合到一起，分为材耗和能耗两类进行总体分析。

表 5-5 洗碗机输入清单数据质量矩阵

	材料名	数据质量指标值	综合指标值
原材料	不锈钢	(2,1,2,2,1)	1.5
	铁	(2,2,1,1,1)	1
	钢板	(2,1,2,1,1)	1
	冷轧钢板	(2,2,2,1,1)	1.5
	铜	(1,1,2,1,2)	1
	硬纸板	(2,1,1,2,1)	1
	EPS	(1,2,3,1,1)	1.5
	纸	(1,2,1,1,2)	1
	PA66	(1,1,1,3,1)	1
	PP	(2,1,1,2,2)	1.5
	POM	(1,1,2,1,1)	1
	PA	(1,1,3,1,1)	1
	ABS	(1,1,2,1,1)	1
	PVC	(1,1,3,1,1)	1
	丁苯橡胶	(1,1,2,1,1)	1
能耗	电能	(1,2,2,2,2)	1.5
	水	(2,1,2,2,2)	1.5

(1) 洗碗机清单材料消耗与能耗数据质量评价

按照第三章介绍的数据质量评价方法,对清单数据质量进行初步的定性评估,数据质量矩阵如表 5-5 所示。

(2) 洗碗机清单数据概率分布

依据第三章和第四章的方法,结合表 3-3 与表 4-1,得出表 5-6 所示概率分布表。

表 5-6 洗碗机材耗与能耗数据质量表

	材料名	变量	数据质量指标值	综合指标值	(α,β)	P 值	变化范
原材料	不锈钢	X_1	(2,1,2,2,1)	1.5	(3,3)	15%	$\pm 15\%$
	铁	X_2	(2,2,1,1,1)	1	(4,4)	10%	$\pm 10\%$
	钢板	X_3	(2,1,2,1,1)	1	(4,4)	10%	$\pm 10\%$
	冷轧钢板	X_4	(2,2,2,1,1)	1.5	(3,3)	15%	$\pm 20\%$
	铜	X_5	(1,1,2,1,2)	1	(4,4)	10%	$\pm 15\%$
	硬纸板	X_6	(2,1,1,2,1)	1	(4,4)	10%	$\pm 10\%$
	EPS	X_7	(1,2,3,1,1)	1.5	(3,3)	15%	$\pm 15\%$
	纸	X_8	(1,2,1,1,2)	1	(4,4)	10%	$\pm 15\%$
	PA66	X_9	(1,1,1,3,1)	1	(4,4)	10%	$\pm 10\%$
	PP	X_{10}	(2,1,1,2,2)	1.5	(3,3)	15%	$\pm 15\%$
	POM	X_{11}	(1,1,2,1,1)	1	(4,4)	5%	$\pm 10\%$
	PA	X_{12}	(1,1,3,1,1)	1	(4,4)	10%	$\pm 15\%$
	ABS	X_{13}	(1,1,2,1,1)	1	(4,4)	5%	$\pm 10\%$
	PVC	X_{14}	(1,1,3,1,1)	1	(4,4)	10%	$\pm 10\%$
	丁苯橡胶	X_{15}	(1,1,2,1,1)	1	(4,4)	5%	$\pm 10\%$
能耗	电能	X_{16}	(2,3,2,2,2)	2	(3,3)	30%	$\pm 30\%$
	水	X_{17}	(2,3,2,2,2)	2	(3,3)	30%	$\pm 30\%$

5.2 洗碗机清单不确定性分析与敏感性分析

在确定清单数据的概率分布后,通过其概率分布逐个的选择随机值并以此计算其环境影响结果。通过该方法获得足够的参数值和影响值,利用前面提到的方法来建立不确定性回归模型。设定理论模型与确定变量之后,需对各变量之间的关系进行分析,应用常用的统计分析软件社会科学统计软件包 (SPSS),用逐步回归分析方法计算建立清单数据回归模型,并对回归模型进行相关检验。

5.2.1 统计分析软件 SPSS 软件介绍

本章使用通用的统计软件包 SPSS19 系统进行建模。SPSS 即 Statistic Package for the Social Science,即“社会科学统计软件包”,它是一个集数据整理、科学计算、分析过程和结果输出等功能于一身的组合式软件包,其界面包

括三部分：程序窗口、数据编辑窗口和 SPSS 结果输出窗口。以下介绍常用数据分析方法的 SPSS 过程。

OLAP Cubes 过程：生成多层表，计算常用统计量。对定性和定量资料进行按行、按列等不同方式进行分层、分组统计。OLAP Cubes 过程的主要语句形式为：

```
OLAP Cubes options;  
Digest variable/options;  
Grouping/options;
```

Case Summaries 过程：对变量按指定格式进行记录列表，并计算相应的统计量。基本语句形式为：

```
Case summaries options;  
Variable/options;  
Grouping variable/options;
```

Case Summaries in Rows 过程：对输出表格作精细定义，按行输出相应的统计量，为纯文本格式。该过程的主要语句形式为：

```
Case summaries in Rows options;  
Column variable /options;  
Terminate column variable/options;
```

Crosstabs 过程：对定性资料进行常规统计计算与检验， χ^2 检验。该过程的语句形式为：

```
Crosstabs options;  
Rows/options;  
Column/options;
```

Line 过程：制作线图，即将数据集中变量之间的线性关系用图表示。该过程的基本语句形式为：

```
Line options;  
Line definition;
```

上述为常用的 SPSS 过程。

5.2.2 清单回归模型的建立及不确定性与敏感性分析

依照前面章节介绍的方法和步骤对洗碗机清单数据进行回归模型的建立。

依据上述确定的数据概率分布，获得足够数据。将获得数据应用到逐步回归分析中，应用 SPSS 软件来实现该过程。最后得出回归方程式（5-1），这里取显著性水平 $\alpha=0.05$ 。最后的逐步回归结果如表 5-7 所示。

$$Y=149.016+90.215X_1+79.117X_2+50.333X_3+32.105X_4+0.0189X_8+0.0211X_{13}+3.225X_{16}+0.033X_{17} \tag{5-1}$$

定义样本决定系数 $R^2=\frac{SSR}{SST}=1-\frac{SSE}{SST}$ (5-2)

模型的 F 检验： $F=\frac{MSR}{MSE}$ (5-3)

MSR 为回归均方： $MSR=\frac{SSR}{p-1}$ (5-4)

MSE 为残差均方： $MSE=\frac{SSE}{n-p}$ (5-5)

样本决定系数 $R^2=0.92579$ ， $F=30.64$ ， $F_{\alpha}(p,n-p-1)=19.43$ ，得出 $F>F_{\alpha}$ 。由决定系数看，回归方程高度显著。据表 5-7，自变量 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_8 、 X_{13} 、 X_{16} 、 X_{17} 对 Y 均有显著影响，其中 X_1 的 $P=0.891$ 最大，但仍在显著水平上。因此，由所有的统计信息可知，该回归模型是有意义的。

表 5-7 回归系数表

Model	Unstandardized coefficient	Standardized coefficient	t	Sig.
常量	149.016		2.255	
X_1	90.215	0.611	56.711	0.891
X_2	79.117	0.375	13.336	0.456
X_3	50.333	0.239	10.118	0.370
X_4	32.105	0.074	6.549	0.275
X_8	0.0189	0.016	1.124	0.042
X_{13}	0.0211	0.018	2.217	0.131
X_{16}	3.225	0.058	4.649	0.275
X_{17}	0.033	0.027	3.799	0.214

表 5-8 方差分析表

Source of Variation	SS	MS	F	p
Regression	47.20	6.74	30.64	<0.0001
Error	3.78	0.22		
Total	50.98			

方差分析结果如表 5-8 所示。MSE=0.22，MSR=6.74，这个模型一共包含 8 个因素：X₁、X₂、X₃、X₄、X₈、X₁₃、X₁₆、X₁₇，与其他因素相比，这些因素为不确定性较大的因素。依据表 5-7 和表 5-9 比较其标准化系数和偏回归平方和所占比例，可得出重要性排序为：X₁>X₂>X₃>X₄>X₁₆>X₁₇>X₁₃>X₈。

表 5-9 偏回归平方和

变量	Q	$S_i(Q_i/Q_t)$
X_1	350.017	0.3927
X_2	171.105	0.19199
X_3	136.911	0.1536
X_4	57.777	0.0648
X_8	36.822	0.04132
X_{13}	41.175	0.0462
X_{16}	52.316	0.0587
X_{17}	45.101	0.0506
总偏回归平方和	891.224	

在回归分析结果中，得知对回归方程结果贡献较大的因素有 X₁、X₂、X₃ 和 X₄，占将近 75%。因此，不锈钢、铁、钢板和冷轧钢板的数据质量对结果的不确定性产生较大的影响。而电能和水也是对结果不确定性影响较大的因素，因为洗碗机生命周期中电能和水的数据与其使用寿命有关，洗碗机寿命除了与产品本身的性能有关，还与使用习惯和使用强度有关，不同的使用习惯和使用强度会影响洗碗机的寿命。X₁₃ 和 X₈ 即 ABS 和纸对结果不确定性也有较明显的影响。由此可知，在清单分析之前，应采取合适的方式和更多的关注对这 8 种材料的数据进行收集。

依据公式（4-7）可以建立不确定性表达式，且其传播用绝对误差来表示：

$$\begin{aligned} \Delta Y = & 90.215|\Delta X_1| + 79.117|\Delta X_2| + 50.333|\Delta X_3| + 32.105|\Delta X_4| \\ & + 0.0189|\Delta X_8| + 0.0211|\Delta X_{13}| + 3.225|\Delta X_{16}| + 0.033|\Delta X_{17}| \end{aligned} \tag{5-6}$$

当输入参数改变时，用公式（4-7）就可以计算出最终结果的不确定性。

5.3 本章总结

本章以洗碗机生命周期评价中清单的不确定性分析研究为例，对本文建立的生命周期评价中清单的不确定性分析方法进行了验证。首先对洗碗机清单数据质量进行定性的评估，然后对数据进行分类和适当处理，确定数据的概率分布，建立回归分析模型，随机模拟清单数据的不确定性并将其对最终结果的影响进行敏感性分析，得出对结果不确定性较为敏感的因素。

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

随着生命周期评价方法应用的逐渐增加和成熟, LCA 中被忽略的问题也越来越受到研究者的关注。为了提高评价结果的可靠性, 生命周期评价中的不确定性分析也越来越受到研究者的关注。由于生命周期评价中由清单引起的不确定性广泛存在, 本文就此问题提出了生命周期评价中清单的不确定性研究方法, 并以实例验证。本研究主要工作及内容包括:

(1) 产品生命周期评价中不确定性分类。首先对 LCA 不确定性进行定义, 并对 LCA 中存在的 uncertainty 依据其来源进行分类, 并重点分析清单不确定性。

(2) 分析了清单不确定性的种类和来源, 对数据进行分类, 并对数据缺失和空白的情况提出合理的处理方法。将数据的不确定性用定性的方法表达, 给数据质量评分, 并将数据质量转换为随机分布对数据不确定性进行随机模拟。

(3) 用回归模型建立清单的不缺性和最终结果之间的关系, 以确定不确定性的传播, 并将各影响参数与最终结果之间的线性关系用回归模型表示, 通过偏回归平方和的解析, 将清单各参数对最终结果的敏感性进行分析, 得出生命周期评价中清单对最终结果的不确定性的影响, 为 LCA 提供参考的依据, 提高 LCA 研究的可靠性。

(4) 运用实例验证产品生命周期评价中清单不确定性分析方法的可行性。选取洗碗机作为验证该方法可行性的实例。

6.2 工作展望

生命周期评价的研究在国内起步相对较晚, 生命周期评价中不确定性分析的研究更是相对较晚, 很多有关 LCA 不确定性的研究基本上还是停留在基础理论和宏观框架上, 且国内关于 LCA 不确定性的研究相对于 LCA 的研究较少, 缺少深入的研究。本文将定性和定量的方法结合起来考虑, 引进回归分析, 研究相对较为新颖, 但是由于一些主观和客观的原因, 本研究仍然存在许多问题, 需要进一步研究、修改和完善, 其中主要包括:

(1) 生命周期评价中, 清单分析需要大量的数据, 虽然国内外发展了很多数据库, 但是这些基础数据库仍然满足不了清单分析的需求, 因此, 基础数据库的发展和完善仍是 LCA 研究的一个发展方向。

(2) 本文中只研究了清单数据引起的对 LCA 结果的不确定性, 但是在评价中, 往往会有很多的因素引起结果的不确定性, 因此, 将所有不确定性因素考虑进来并给与综合的不足定性评估也是完善该研究的一个方向。

参考文献

- [1] 联合国环境规划署.全球环境展望:为了发展保护环境[R],2007.
- [2] 陆燕荪.中国制造业的现状与未来发展[J].经济研究参考,2005,1:5-14.
- [3] 周智伟.全球化背景下我国新工业化战略探讨[D].南京:南京理工大学,2004.
- [4] 龙静.基于行业生命周期的企业财务战略选择[D].成都:西南财经大学,2007,2-5.
- [5] 陈颖.点击 21 世纪初的中国家电产业[J].中国检验检疫,2003,1:52-53.
- [6] 陈航远.家电行业的发展趋势综述[J].上海工业,2003,4:36-37.
- [7] 施婷.家电企业正在回暖[J].家电科技,2009,19-23.
- [8] 孙博.洗碗机生命周期分析及其应用研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.
- [9] 刘微.LCI 数据质量体系中的分析方法研究[D].北京:北京工业大学,2006.
- [10] 李劲,王华.基于 LCA 的城市生活垃圾回收处理系统不确定性分析[J].上海环境科学,2011,2:47-50.
- [11] 郑元,张天柱.不确定数据条件下的生命周期评价及其应用[J].重庆环境科学,2003,6:18-20,54.
- [12] 向东等.产品生命周期分析中的数据处理方法[J].计算机集成制造系统,2002,8(2):150-154.
- [13] 莫华.生命周期清单分析的数据质量评价[J].环境科学研究,2003,16(5):55-58.
- [14] 顾国刚.电动汽车与内燃机汽车动力系统生命周期评价对比研究[D].合肥工业大学,2011
- [15] 张雷,陈志军,刘志峰,等.家电产品生命周期评价边界界定研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2010,33(3):327-332.
- [16] Mark A.J. Huijbregts, Gregory Norris, Rolf Bretz, et al. Framework for Modelling Data Uncertainty in Life Cycle Inventories[J]. Life Cycle Assess, 2001, 6(3): 127-132.
- [17] John R.May, David J. Brennan. Application of Data Quality Assessment Methods to an LCA of Electricity Generation. Int J LCA, 2003, 8(4): 215-225.
- [18] Raymond R. Tan. Using fuzzy numbers to propagate uncertainty in matrix-based LCI. Int LCA, 2008, 13: 585-592.
- [19] Fulvio Ardente, Giorgio Beccali, Maurizio Cellura, Valerio Lo Brano. Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances. Renewable Energy, 2005, 30: 109-130.
- [20] Shih-Chi Lo, Hwong-wen Ma, Shang-Lien Lo. Quantifying and reducing uncertainty in life cycle assessment using the Bayesian Monte Carlo method.

Science of the Total Environment, 2005, 340: 23-33.

- [21] Bo Pedersen, Weidema, Marianne Suhr Wesnaes. Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. J. Cleaner Prod, 1996, 4(3-1): 167-174.
- [22] Reinout Heijungs, Identification of key issues for further investigation in improving the reliability of life-cycle assessments, J. Cleaner Prod, 1996, 4(34): 159-166.
- [23] BoP. Weidema, Multi-User Test of the Data Quality Matrix for Product Life Cycle Inventory Data, Int. J. LCA , 1998, 3(5): 259-265.
- [24] Dale J. Kennedy, Douglas C. Montgomery, Dwayne A. Rollier, J. Bert Keats, Assessing Input Data Uncertainty in Life Cycle Assessment Inventory Models, Int. J. LCA, 1997, 2(4): 229-239.
- [25] Bengt Steen, On uncertainty priority setting and sensitivity of LCA-based, J. Cleaner Prod, 1997, 5(4): 255-262.
- [26] Anna E. Bjorklund, Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA, LCA Methodology, Int J LCA, 2002, 7(2): 4-72.
- [27] B.Maurice, R. Frischknecht, V.Coelho-Schwartz, K.Hungerbuhler, Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plants, Journal of Cleaner Production, 2000, 8(2): 95 - 108.
- [28] Hirokazu Sugiyama, Yasuhiro Fukushima, Masahik Hirao, Stefanie- Hellweg, Konrad Hungerbühler, Using Standard Statistics to Consider Uncertainty in Industry-Based Life Cycle Inventory Databases, Int J LCA, 2005, 1100(6): 399 - 405.
- [29] Georg Geisler, Stefanie Hellweg, Konrad Hungerbuhler, Uncertainty Analysis in Life Cycle Assessment(LCA): Case Study on Plant-Protection Products and Implications for Decision Making, Int J LCA, 2005, 1100(3): 184 - 192.
- [30] Anders S. G.Andrae, Patrik Molle, JohanLiu, Uncertainty estimation by Monte Carlo Simulation applied to Life Cycle Inventory of Cordless Phones and Microscale Metallization Processes, 2004 International IEEE Conference on Asian Green Electronics(AGEC).
- [31] 赵辉,陈郁,张树深.环境管理工具:生命周期清单分析方法[J].法制与管理,2005,1:26-29.
- [32] 王伟,宋明顺,陈意华等.蒙特卡罗方法在复杂模型测量不确定度评价中的应用[J].仪器仪表学报,2008,29(7):1446-1449.
- [33] 尹增谦,管景峰,张晓宏,曹春梅.蒙特卡罗方法及应用[J].物理与工

程,2002,12(3):45-49.

- [34] 刘涛,黄志甲.生命周期清单不确定性分析的主要数据选择[J].安徽工业大学学报,2006,23(1):91-95.
- [35] 任丽娟,陈莎,张菁菁,等.生命周期评价中清单的不确定性分析[J].安全与环境学报,2010,10(1):118-121.
- [36] 钟流举,郑君瑜,雷国强,等.大气污染物排放清单不确定性定量分析方法及案例研究[J].环境科学研究,2007,20(4):15-20.
- [37] SETAC-Europe, Proceedings of Life-Cycle assessment Workshop, Brussels: ETAC-Europe. 1991.
- [38] 杨建新,徐成,王如松.产品生命周期评价方法与应用[M].北京:气象出版社,2002.
- [39] 李群.不确定性数学方法研究及其在社会科学中的应用[M].北京:中国社会科学出版社,2005.
- [40] SHANNON C E, WEAVER W.The Mathematical Theory of Communication[J]. Mobile Computing and Communications Review, 1948, 5(1): 3-55.
- [41] CLAUSIUS RUDOLF. The Mechanical Theory of Heat: With its Applications to the Steam-engine and to the Physical Properties of Bodies[M]. London: John Van Voorst, 1867:251-256.
- [42] Weidema BP, Wesnaes MS(1996): Data Quality Management for Life Cycle Inventories-An Example of Using Data Quality Indicators [J]. Cleaner Prod 4(3-4): 167-174.
- [43] ISO 14040-1997, Environmental management: life cycle assessment: general principles and framework [S].
- [44] Weidema BP. Multi-user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data [J]. LCA, 1998, 3(5): 259-265.
- [45] Lindfors L-G, Christansen K, Hoffman L, Virtanen Y, Juntilla V, Hanssen O-J, Ronning A, Ekvall T, Finnveden G(1995): Nordic Guidelines on Life-Cycle Assessment. Nord 1995: 20.
- [46] 谢宇.回归分析[M].北京:社会科学文献出版社,2010.
- [47] 苏永华,罗正东,常伟涛.基于模拟试验的加筋切填路基变形影响因素敏感性分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2011,38(3):12-16.
- [48] 章光,朱维申.参数敏感性分析与实验方案优化[J].岩土力学,1993,14(1):51-57.
- [49] Garson GD. Interpreting neural-network connection weights[J]. AI Expert, 1991, 6(4): 47.
- [50] 罗鹏程,傅攀峰.武器装备敏感性分析综述[J].计算机工程与设计:29(21):

5546-5549.

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 朱立红, 刘光复. 生命周期清单的不确定性分析[J]. 合肥工业大学学报, 已录用.

攻读硕士学位期间参与的科研项目

- 1 国家发展改革委应对气候变化专项“我国低碳认证制度建立研究”。
- 2 “863”国家高技术研究发展计划项目“面向产品全生命周期的绿色设计方法与技术研究”（2007AA04Z123）