

# 硕士 学位 论 文

## 机电产品全生命周期清单数据库设计及语义 分析建模研究

**Study on the Life Cycle Inventory Database Design and  
Semantic Analysis Modelling for Electromechanical products**

作 者 姓 名: 李佳伟

学 科、 专 业: 机械电子工程

学 号: 21904104

指 导 教 师: 张应中

完 成 日 期: 2022/04/28

大连理工大学

Dalian University of Technology

## 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：机电产品全生命周期清单数据库设计及语义分析建模研究  
作 者 签 名：李佳伟 日期：2022 年 6 月 6 日

## 摘要

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）是目前国内外公认的评价产品和服务对环境影响最有效的方法。LCA 方法的一个重要步骤是产品生命周期清单（Life Cycle Inventory, LCI）分析，即构建产品在其整个生命周期中从原材料获取、产品生产、使用直至服役后处置的每一个过程对资源和环境的影响数据。量化数据是科学有效地进行评价的依据，LCI 分析是有效实施 LCA 的基础和关键。

首先，本文对 LCA 分析方法、LCI 数据库及 LCI 分析语义建模技术研究现状及其对应工具软件进行综述。结合目前最新软件开发技术及参考国际上 LCA 软件，提出一个新的基于 B/S 网络云服务架构的 LCI 分析工具软件框架；针对机电产品 LCI 分析建模特点，提出一个面向机电产品的 LCI 分析数据模型和关系型的 LCI 数据库设计；该数据库包含 20 余张关系数据表，并导入了 Ecoinvent 通用数据集，使其包含 2000 多个基本流数据、多个典型机加工过程数据和一些常用的影响评价方法等；开发了基于矩阵线性求解的清单数据计算方法和程序。

针对目前产品 LCI 数据主要以关系型数据库存储、缺乏语义和知识表示问题，本文开展了面向机电产品的 LCI 分析语义建模研究，通过对 LCI 数据及分析涉及的概念和关系的深入分析，采用 OWL 构建了产品 LCI 数据本体模型，包括流本体、过程本体等多个本体概念的定义，通过知识规则丰富产品 LCI 知识表示；将产品 LCI 分析表示为由本体标注的过程、流作为节点，属性作为关系边的 LCI 分析知识图，实现产品的语义关联，从而为 LCI 清单分析的语义查询和各种知识处理打下基础，提高 LCI 分析及数据查询的质量和效率。

本文提出的方法和模型基于 Java 等编程语言和工具编程实现，并以 2.5MW 风电机组为例，验证了提出的模型和方法的可行性与准确性；分析结果表明本文提出的方法和模型可以初步完成产品 LCI 语义分析建模；通过测试比较，构建的 LCI 数据正确、符合要求，支持语义查询。

**关键词：**生命周期评价；数据库；知识表示；语义查询；LCA 服务平台

# Study on the Life Cycle Inventory Database Design and Semantic Analysis Modelling for Electromechanical products

## Abstract

Life Cycle Assessment (LCA) is currently recognized at home and abroad as the most effective method to evaluate the environmental impact of products and services. An important step of the LCA approach is the product life cycle inventory (LCI) analysis, which is to construct the data of resource and environment impact of each process of a product in its entire Life Cycle, from raw material acquisition, product production, use to post-service disposal. Quantitative data is the basis for scientific and effective evaluation. Hence, LCI analysis is the basis and key for effective implementation of LCA.

Firstly, this paper reviews the research status of LCA analysis methods, LCI database, LCI analysis semantic modeling technology and its corresponding tool software. Combined with the latest software development technology and reference to international LCA software, a new LCI analysis tool software framework based on B/S network cloud service architecture is proposed. According to the characteristics of mechanical and electrical products LCI analysis modeling, a data model of mechanical and electrical products LCI analysis and a relational LCI database design are proposed. The Ecoinvent database contains more than 20 relational data tables and contains more than 2000 basic flow data, several typical machining process data and some commonly used impact assessment methods. The calculation method and program of inventory data based on matrix linear solution are developed.

At present, product LCI data are mainly stored in relational database and lack of semantic and knowledge representation. This paper carries out research on semantic modeling of LCI analysis for electromechanical products. Through in-depth analysis of LCI data and concepts and relations involved in analysis, OWL is used to build product LCI data ontology model. Several ontology concepts including flow ontology, process ontology and so on are defined, and knowledge rules are used to enrich product LCI knowledge representation. The product LCI analysis is represented as a knowledge graph of LCI analysis with ontology-annotated processes and flows as nodes and properties as relational edges to realize the semantic correlation of products, thus laying a foundation for semantic query and various knowledge processing of LCI analysis and improving the quality and efficiency of LCI analysis and data query.

The proposed method and model are implemented based on Java programming language

and tools, and the feasibility and accuracy of the proposed model and method are verified by taking 2.5MW wind turbine as an example. The analysis results show that the proposed method and model can preliminarily complete the semantic analysis modeling of product LCI. Through the test comparison, the constructed LCI data is correct, meets the requirements, and supports semantic query.

**Key words:** Life cycle assessment; Database; Knowledge representation; Semantic query; LCA service platform

## 目 录

摘要 .....	I
Abstract .....	II
1 绪论 .....	1
1.1 课题背景和意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 LCA 方法及 LCI 数据库 .....	2
1.2.2 LCI 分析语义建模技术 .....	3
1.3 论文主要工作 .....	4
1.4 论文篇章结构 .....	4
2 相关理论与技术基础 .....	6
2.1 产品清单分析 .....	6
2.1.1 生命周期评价框架 .....	6
2.1.2 清单数据格式 .....	7
2.2 语义技术相关理论 .....	8
2.2.1 Unicode/URI .....	8
2.2.2 XML .....	9
2.2.3 RDF/RDFS .....	9
2.2.4 OWL .....	10
2.2.5 SWRL/SQWRL .....	10
2.3 LCSI-DS 模型框架设计 .....	11
2.4 开发平台相关技术 .....	13
2.4.1 B/S 模式 .....	13
2.4.2 SpringBoot 框架 .....	13
2.4.3 Vue.JS 框架 .....	14
2.4.4 Spring Data JPA .....	14
2.5 本章小结 .....	15
3 产品 LCI 数据模型及数据库设计 .....	16
3.1 基于过程的产品 LCI 数据模型 .....	16
3.2 产品 LCI 数据库设计 .....	18
3.2.1 技术领域的数据集 .....	19
3.2.2 环境领域的数据集 .....	24
3.3 数据库实体关系表设计 .....	26
3.2.1 通用数据表设计 .....	26

3.2.2 应用数据表设计 .....	29
3.4 清单数据计算 .....	32
3.5 本章小结 .....	35
4 产品全生命周期清单分析语义模型 .....	36
4.1 产品 LCI 本体概念模型 .....	36
4.1.1 流本体概念模型 .....	37
4.1.2 过程本体概念模型 .....	38
4.1.3 其他本体概念模型 .....	41
4.2 产品 LCI 分析的语义表示 .....	42
4.2.1 构建产品系统实例 .....	43
4.2.2 构建过程实例 .....	44
4.2.3 构建流实例 .....	45
4.3 产品 LCI 语义知识映射规则 .....	45
4.4 清单分析语义查询 .....	48
4.4.1 清单分析语义查询需求 .....	48
4.4.2 清单分析语义查询机制 .....	49
4.5 本章小结 .....	50
5 产品全生命周期清单数据库构建及语义建模 .....	51
5.1 开发平台及软件工具 .....	51
5.2 LCI-EM 数据库 .....	52
5.3 LCI-SM 知识库 .....	58
5.3.1 产品 LCI 知识库搭建 .....	58
5.3.2 产品 LCI 语义查询 .....	61
5.4 应用实例 .....	62
5.4.1 产品系统模型 .....	62
5.4.2 清单结果查询 .....	63
5.5 本章小结 .....	64
总结与展望 .....	65
参考文献 .....	66
攻读硕士学位期间发表学术论文情况 .....	70
致 谢 .....	71
大连理工大学学位论文版权使用授权书 .....	72

# 1 绪论

## 1.1 课题背景和意义

随着全球范围能源、资源与环境问题的日益突出，可持续发展已成为世界各国的共识。《中国制造 2025》明确提出全面推行绿色制造工程、加快制造业绿色改造升级<sup>[1]</sup>。全生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）方法是目前国内外公认的评价产品和服务对环境影响最有效的方法<sup>[2]</sup>。1990 年，国际环境毒理学和化学学会首次提出了“生命周期评价”的概念。1997 年，国际标准化组织制定了 ISO14040—ISO14043 系列 LCA 标准，对生命周期评价做了详细的规定<sup>[3]</sup>。LCA 方法自提出以来，已经在各个经济领域得到广泛的应用<sup>[4-7]</sup>。LCA 方法主要分为四个阶段，即目标与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释。其中第二阶段的产品全生命周期清单（Life Cycle Inventory, LCI）分析最为重要，在该阶段编纂产品和服务在其全生命周期阶段每一个过程对资源和环境的输入和输出的量化数据，量化数据是科学有效地进行评价的依据，因此 LCI 分析是有效实施 LCA 的基础和关键。

机电产品的 LCI 数据涉及大量单元过程的环境数据，大规模的数据存储、计算、应用离不开数据库系统的支持。目前，有很多广泛使用的生命周期清单数据库，以及一些 LCA 软件工具，如 SimaPro<sup>[8]</sup>、GaBi<sup>[9]</sup>、OpenLCA 等，其中 OpenLCA 是目前应用较广的开源 LCA 软件。通过对这些数据库的研究，发现这些数据库具有一定的区域性，与各国的行业发展、经济实力有关。此外，对于机电产品 LCA 还存在如下问题：

(1) 针对机电产品，尚缺乏完备的生命周期清单数据库<sup>[10]</sup>。研究表明，对于可能造成重大环境负荷的过程，清单数据的收集尤为重要。现在有的生命周期数据库中，主要包括原材料生产过程、能源产品生产过程和运输过程。相对材料和能源连续生产过程，机电产品制造过程大都是离散制造过程，通过零件制造和装配组装，生产出复杂机电产品，清单数据和分析有较大的差异性。

(2) 机电产品的生命周期中存在大量的过程，过程和过程之间相互关联关系是完整 LCA 数据链的关键。传统的数据分析软件根据关键词进行产品和过程的匹配，过程和产品的语义信息没有得到充分利用。

为了解决以上问题，并满足机电产品能够进行 LCA 分析的基本数据需求，通过对 LCA 数据库发展现状以及语义技术在 LCA 领域应用现状分析，本文开展了机电产品全生命周期清单数据库设计及清单语义分析建模研究，提出新的 LCI 清单实体模型(Life Cycle Inventory Entity Model, LCI-EM)和 LCI 清单语义模型(Life Cycle Inventory

Semantic Model, LCI-SM), 并搭建产品全生命周期语义清单数据库系统(Life Cycle Semantic Inventory Database System, LCSI-DS), 对提出的模型进行实现。LCSI-DS 基于 LCI-SM 模型, 将 LCI-EM 的清单数据进行语文化建模, 为产品生命周期中的清单数据的语义表示和处理奠定基础。本文工作对于促进 LCA 方法在机械行业应用和绿色设计制造技术的发展有重要意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 LCA 方法及 LCI 数据库

在 1969 年, 可口可乐公司为了验证塑料瓶是否可作为玻璃瓶的替代品, 分别对塑料和玻璃的原材料使用量及污染物排放量进行严格地量化分析<sup>[11]</sup>, 根据量化分析结果对这两种材料进行优劣性评价, 这次探索被视为人类历史上首次 LCA 实施。自二十世纪九十年代, LCA 开始受到人们广泛地关注, 且经过不断的发展 LCA 的方法体系变得越来越完善。1997 年, 第一个 LCA 相关标准由国际标准化组织所制定, 在随后的一段时间里该组织又相继发表了 LCA 技术报告及国际标准。1999 年, 我国采用了 LCA 相关国际标准<sup>[12]</sup>。在制造行业, 为了评价机械产品生产过程对环境的影响, 我国制定了机械产品生命周期评价的标准<sup>[13, 14]</sup>, 并逐步完善更详细的机电产品的评价标准<sup>[15-18]</sup>。

在 LCI 数据库开发方面, 瑞士、荷兰、瑞典、丹麦、等欧洲国家以及美国等相关研究起步较早, 并取得了重大的成果。欧洲在 LCI 数据库的研究方面起步最早, 且开发技术也最为成熟, 已有的成果包括: Gabi 数据库、Ecoinvent 数据库及 LCDN 数据库, 这些数据库涉及的数据和环境影响类型十分丰富。LCDN 数据来源于欧盟商业协会提供的生命周期清单数据以及主要材料、资源和能源的消耗、产品的使用及运输、废弃物的处理等<sup>[19]</sup>, 该数据库支持产品环境足迹 PEF 和组织环境足迹 OEF 标准, 因此该数据库是进行 LCA 研究的有效工具。由瑞士开发的 Ecoinvent 数据库<sup>[20]</sup>, 其数据来源于多个行业, 该数据库广泛应用于生命周期评价、环境产品声明、环境化设计以及碳足迹设计规划等领域, 也是一个用于 LCA 评价的有效工具。德国 PE 国际有限公司开发的 Gabi 数据库为商业用户提供最新的 LCI 信息, 数据来源于国际上各个行业、协会和公共部门收集的 LCI 数据, 并根据行业资源、科学知识、技术文献和内部专利信息定期更新。

其他国家和地区也有建立自己的数据库。美国开发出了 USLCI 数据库, 该数据库为美国提供材料生产、零部件加工或产品装配的相关能源流以及材料流, 满足对多种情形的环境影响评价。此外, 还有加拿大开发的 CRMD 数据库, 澳大利亚开发的 Australian LCI Database<sup>[21]</sup>, 日本开发的 Input-Output 数据库。中国四川大学王洪涛团队<sup>[22, 23]</sup>开发的 CLCD 数据库等。

### 1.2.2 LCI 分析语义建模技术

本体概念最早是在哲学领域中提出的<sup>[24]</sup>，且随着信息技术、语义 web 技术的不断发展，本体研究已经扩展到了文学、环境、金融、建筑、计算机信息智能集成等多领域中。在计算机领域中，已经有很多技术人员对本体概念都提出了自己的看法。Neches<sup>[25]</sup>等认为本体由特定领域中的概念、关系以及基于概念和关系延伸出的各种规则而组成<sup>[26]</sup>。1993 年，Gruber<sup>[27]</sup>给出本体定义，即本体指的是一种明确的、被广泛支持的和概念化的规范。Borst<sup>[28]</sup>基于 Gruber 的定义提出了自己的见解：本体是一种支持共享的形式化规范。Studer 等<sup>[29]</sup>认为本体定义包含概念化、明确性、形式化和共享性这四层含义，故本体指的是支持共享的明确的、形式化的概念规范。

在产品生命周期评价领域内，越来越多的研究者集中在语义和本体应用到 LCI 建模上。Bertin 等<sup>[30]</sup>提出了一种用于生命周期清单数据库建模的语义方法。他们认为 LCI 数据库包含成千上万个相互关联的过程，因此计算机会很难理解 LCI 模型。另外，生命 LCA 过程及其相互关系的语义相似性特别明显。因此，应该将语义信息添加到 LCI 模型中，并且可以通过建立两层模型来重新组合过程。戴维斯等提出了一种将 LCA 集成到基于代理的模型（ABM）中的方法，该模型是一种仿真工具，它允许许多实体（或代理）做出简单的决策，并与彼此以及周围的虚拟世界进行交互。Villa 等<sup>[31]</sup>认为语义感知的环境建模是设计，实现和部署环境数据集和模型的一种方式，并回顾了新兴的环境建模语义方法。Earthster 核心本体（ECO）是 LCA 的核心领域本体，它是 Earthster 项目<sup>[32]</sup>的一部分，旨在促进 LCA 数据在网络上的公开发布和共享以及供应链中不同组织之间的信息共享。ECO 定义了一些基础的、核心的本体，例如时间概念，政府组织概念、地理位置概念和概念之间的关系。Janowicz 等<sup>[33]</sup>提出一种最小本体设计模式作为 LCA 数据的共同核心。该设计模式旨在形成生命周期清单关键要素语义描述的共同核心。它涵盖了执行生命周期评价的过程，但不提供多种空间，时间，和专题属性用于库存物品范围。最小本体模式旨在促进现有实体模型、规范和软件之间的互操作性，目的是为更广泛的 LCA 社区中对语义迅速增长的兴趣充当联合构建块。Tao 等<sup>[34]</sup>定义一个生命周期标准实体模型(LCSDM)，在产品开发过程中管理和共享生命周期信息。LCSDM 是一个在比较评价中收集数据的一个通用的和结构化的框架，能够表示部件和程序集之间关系的数据结构。每个部件或装配都由一组节点定义，这些节点描述了生命周期的各个阶段(例如，材料、制造、使用、寿命结束和运输)。Overcash 等<sup>[35]</sup>提出了单元过程生命周期清单(Unit Process Life Cycle Inventories， UPLCI)的概念。UPLCI 目的在于创建可重复使用、定量描述每个单元工艺步骤(如钻孔、连接、表面涂层等)的能源/质量效率，这些步骤共同将材料作为输入，并实现产品(工业、消费和军事)的最终制造。UPLCI 努力

为分类中的每个单独的单元过程创建一个单元过程能量和质量效率工具。UPLCI 工具允许用户使用不同的材料、初始形状和中间形状来计算零件的制造能量和材料损失。Mittal<sup>[36]</sup>等提出了一套耦合的语义实体模型，即本体，以推进化工产品生命周期清单数据的自动化建模。该模型用一个分支本体来揭示从原材料(如原油或生物材料)生产一种化学品所需要的所有合成步骤，用一个过程本体来管理描述与每个合成步骤相关的各种单元过程的数据。这两种本体是耦合的，过程数据(库存建模的基础)通过化学反应和反应参与者等关键概念链接到谱系数据。该语义模型提供了一系列基于祖先和父概念的 SPARQL 查询，以从一组反应数据生成感兴趣的化学物质的谱系。通过建立谱系沿袭，流程本体可以用于指导基于数据挖掘(自顶向下)和模拟(自底向上)方法的清单建模。

### 1.3 论文主要工作

本文研究工作来源科技部国家重点研发计划项目“机电产品全生命周期清单数据语义建模与动态收集技术(2020YFB1711601)”，主要有以下工作：

(1) LCI-EM 实体模型分析：通过对机电产品生命周期评价模型的研究分析，总结出全生命周期评价过程中的数据特点，并分析了国内外成熟 LCI 数据库的数据存储模式，利用 Spring Data JPA 技术，在 MySQL 数据库平台上开发 LCI 分析数据需求的 LCI 数据库，用于存储机电产品生命周期评价过程中产生的清单数据，并构建相应的 LCA 分析建模平台，实现对清单数据的操作、计算，为后续工作提供数据支持。

(2) LCI-SM 语义模型构建：研究面向机电产品制造特点的 LCI 数据模型和数据库，分析数据库实体模型之间的语义关系，利用网络本体语言 OWL 对产品清单数据进行语义化建模，建立满足数据库实体模型的语义表示模型，构建 LCI 数据语义本体，实现对清单数据的语义检索、查询。

(3) LCSI-DS 设计和开发：首先对 LCSI-DS 的需求进行分析，根据分析结果对数据库模块和语义模块展开详细设计。在搭建 LCSI-DS 的同时，实现语义模块与数据库模块的连接和交互，最终可实现 LCSI-DS 全部功能。

### 1.4 论文篇章结构

论文包含六章内容，具体的论文结构与安排如下：

第一章：绪论。先论述了本次研究的背景及意义，随后分别介绍了 LCA 和语义 Web 国内外研究现状，并分析和总结现有 LCA 研究的弊端，再确立本次研究所采用的理论方法和技术手段，最后对本次研究的主要工作进行大致介绍。

第二章：相关理论与技术介绍。首先介绍生命周期评价框架和清单数据格式，随后介绍语义 Web 的相关技术，然后基于上述理论进行机电产品 LCI 语义建模框架设计，

最后介绍开发平台相关技术。

**第三章：LCI-EM 模型的建立。**将机电产品 LCA 分析涉及的数据抽象为实体模型。根据实体模型和产品系统的关系，将实体分为通用数据集和应用数据集，用于存储产品生命周期范围内的清单数据，为 LCI 语义建模提供原始数据。

**第四章：LCI-SM 模型的构建。**在借鉴相关研究成果的基础上，结合 LCI-EM 数据库模型的特性，构建机电产品清单数据领域本体模型(LCI-SM)。根据清单分析所涉及的数据关系，定义了语义模型中各种类之间相互关系。

**第五章：LCSI-DS 系统的搭建。**首先进行系统需求分析，确定需要更全面的过程数据和数据的语义关系的需求后，基于前文确立的方法和技术手段，构建相应的 LCI-EM 平台和 LCI-SM 平台，并进行 LCSI-DS 系统架构设计与开发，最终以风电机组作为实例，验证了开发平台的合理性及科学性。

**第六章：总结与展望。**总结本次研究已有成果及特色，并指出课题的不足及未来的发展方向。

## 2 相关理论与技术基础

### 2.1 产品清单分析

#### 2.1.1 生命周期评价框架

现阶段,国内外存在多种生命周期评价定义,这些定义虽有不同,但本质是相同的:生命周期评价指的是针对特定产品的全生命周期过程中所涉及的环境影响的汇总及计算。国标 GB/T 26119-2010 提出了机械产品生命周期评价的推荐性标准框架<sup>[13]</sup>,如图 2.1 所示。

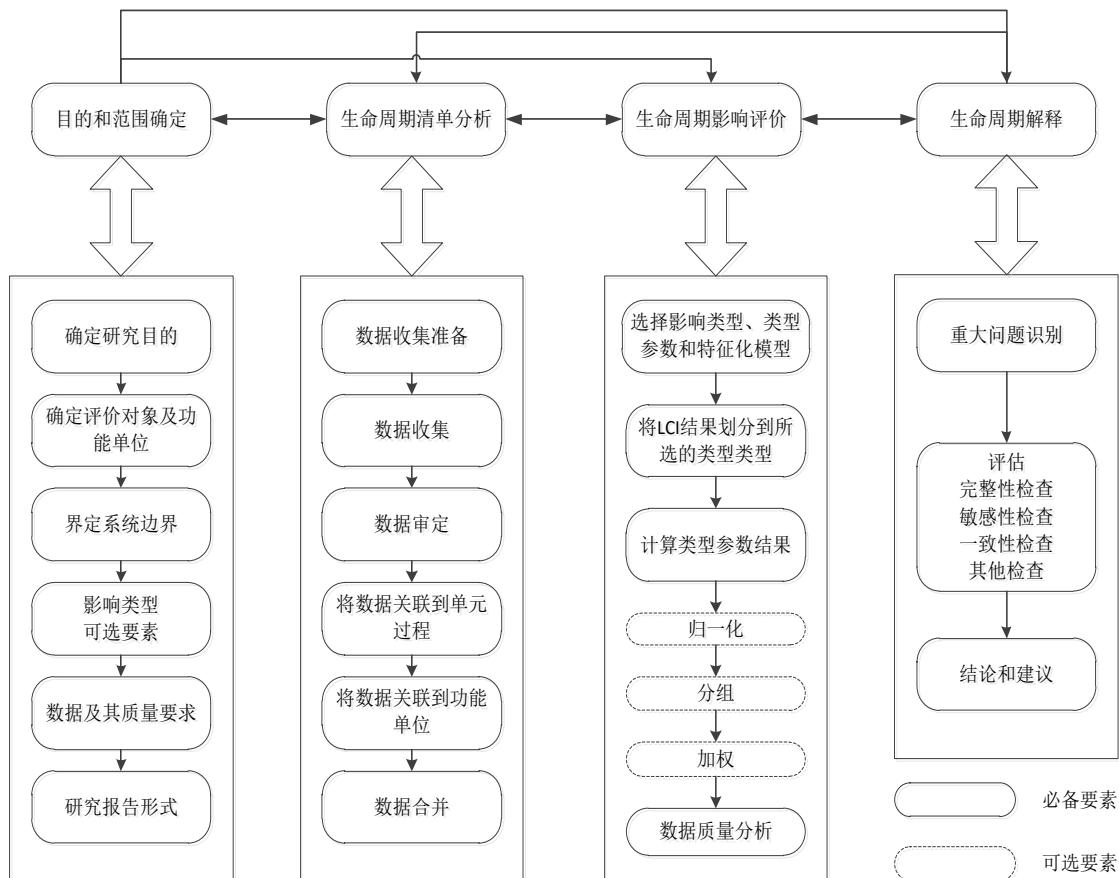


图 2.1 产品 LCA 流程框图  
Fig. 2.1 Diagram of product LCA

下面对该框架的四大组成部分进行简单介绍:

#### (1) 目的和范围确定

目的和范围确定是产品生命周期评价步骤实施的第一步。产品生命周期评价的目的

包括评价的应用意图、进行评价研究的理由及评价结果的适用对象。首先基于评价对象确立本次研究的目标，随之根据目标确定功能单位和边界，再确定单元过程和环境影响类型研究的详略程度。此外，在研究范围内，需要对研究数据的种类、来源、取舍准则和数据质量进行规定。研究范围的确定是准备过程中的必须工作，需要不断的调试，根据调试的结果反复地测试、修改，最终才可以得到想要的结果。

### （2）生命周期清单分析

产品 LCI 分析是 LCA 过程中最重要、最繁杂的阶段。需要对整个产品的生命周期全过程进行分析，进而对所有的数据进行汇编，以供后面的阶段对数据的使用和进一步计算分析。LCI 阶段需要包括产品系统边界内的所有活动的数据，即从“摇篮”到“坟墓”。“摇篮”阶段包括产品的原材料获取阶段，接下来是最产品的生产阶段，对于机械产品而言包含大量的工艺过程，处理过程，产品制造过程前、过程中、生产完成后，以及转移到使用场地的运输阶段也应该被考虑，“坟墓”阶段指的是产品报废后的处理、再利用阶段。以上所述阶段的数据汇编均在 LCI 阶段完成。在 LCA 的研究目的与范围阶段中所提出的对机械产品指定阶段或某个单元过程的环境影响，也可以在 LCI 进行数据的收集、处理与分析。

### （3）生命周期影响评价

产品生命周期影响评价是定量化地分析由清单分析阶段获取的 LCI 数据，包括全生命周期过程中的资源和能源消耗数据及向环境的这种排放数据。并对 LCI 结果数据按照不同的环境影响类型进行分类，分类之后要进一步量化处理。为了量化 LCI 结果，LCA 采用特征化因子，获得环境影响类型参数（Impact Category Indicator）的结果。目前影响评价方法有很多，在不同评价方法下，物质流的特征化因子也不尽相同，因此，这些评价方法得到的结果具有主观性，需要给予解释<sup>[38-40]</sup>。

### （4）生命周期解释

生命周期解释是基于产品 LCI 和 LCIA 阶段的结果进行说明的阶段。该阶段不仅要对之前得到的结果进行进一步解释，还需要包含一致性、完整性、敏感性的评估，以便理解结果的不确定性。通过向决策者展示清单数据、环境影响的结果，并且对结果进行评价、解释，为产品的环境影响提供科学判断的依据。

## 2.1.2 清单数据格式

目前各个国家开发的数据库采用的技术标准有较大差别、环境状况不同、数据的来源及存储格式不同、LCA 数据的精准度参差不齐，这些都造成数据具有多源性，因此各个数据库中的数据通用性较差。

由于生命周期清单数据包含从原材料的投入到污染的排放，这些数据分布广泛、来源不同、数据类型复杂，收集工作较为困难。目前很多国家都开发了 LCI 数据库，但是存在着数据无法共享的问题，这是因为每个数据库的研发都是自主的，导出格式不同，但 LCA 的进行需要的数据范围、种类都是巨大的，十分需要各个数据库之间能够进行数据的共享。因此 LCI 数据格式非常重要，目前主要有如下 LCI 数据格式：

### 1. ISO/TS 14048 国际标准

ISO14048 国际标准为 LCA 各种软件的 LCI 数据都制定了相应的标准，标准具体表现为一个针对数据存档的具体要求和大致框架，制定标准后可以方便不同 LCI 数据库之间进行数据共享与交流，对数据的收集、计算、处理，数据质量等方面提供了规范<sup>[40]</sup>。ISO14048 把过程作为数据元，数据被划分为过程数据、建模信息、管理信息三部分数据<sup>[41]</sup>。过程数据主要指的是整个生命周期过程中输入输出的数量信息以及用于描述过程的信息。建模信息包含过程的应用目标、建模原则、数据来源、数据验证等信息。管理信息包含数据的生成人员、存档人员、完成日期、版权等信息。

### 2. EcoSpold 数据格式

ISO14048 标准只是一个框架性的描述，并没有对数据、字段做出明确的要求和限制。瑞士 EcoInvent 组织为数据之间的交换提供了一套 XML 模版，即 EcoSpold 数据格式。EcoSpold 这种格式将生命周期数据划分为影响评价实体以及过程实体两种模型。过程实体模型中，生命周期过程中的数据过程包括流数据、过程信息和建模验证等。流数据分为基本流和产品流，它包含流的计算公式、流的具体名称和数量、流的属性信息及环境影响相关数据。此外，一些特殊的流还会包括流参数信息，参数信息是实体模型的主要数据。建模验证过程包括审阅、校对数据的技术人员信息和数据代表性。管理信息包含版权、出版刊物、数据生成人员、存档人员等信息。EcoSpold 格式是目前最通用的一种 LCI 数据的格式，已经更新到 EcoSpold02 版本。

## 2.2 语义技术相关理论

2006 年，Tim Berners-Lee<sup>[42]</sup>给出了语义的层次体系结构，如图 2.2 所示。语义 Web 体系结构包含了语义 web 涉及的所有技术及技术之间的层级关系，每一层技术都实现了一定的功能，并为上层的技术提供基础。上层技术通过弥补下层技术自身存在的缺陷，不断扩展能够提供的功能，将语义体系变得更加完善<sup>[43]</sup>。

### 2.2.1 Unicode/URI

Unicode（统一资源编码）和 URI 构成了语义 web 的基础结构。Unicode 的主要作用是规范和统一资源编码。URI 是网络资源的全局标识符，任何两个网络应用可以通过

URI 来引用同一个事物。并且，URI 支持解引用，通过使用 URI 包含的所有信息，可以定位网络中的一个文件或文件中的位置，获取该 URI 所表示的资源的详细信息。

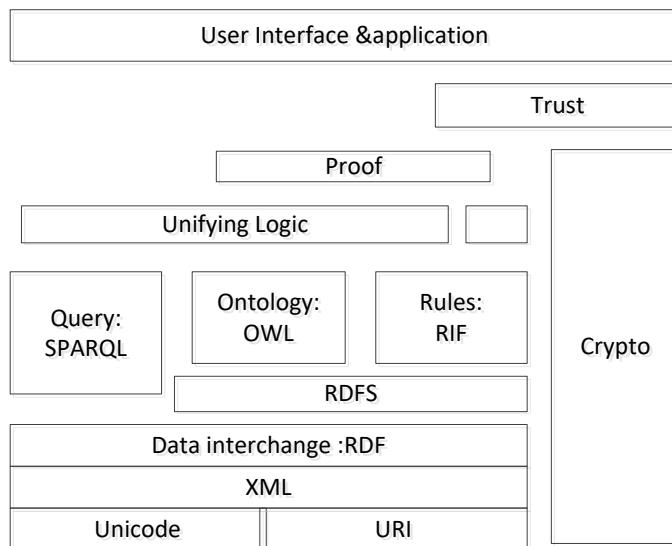


图 2.2 语义 web 的体系结构  
Fig. 2.2 Diagram of the architecture for the Semantic Web

## 2.2.2 XML

XML 是一种元标记语言，通过元素和属性描述数据的结构，实现了数据和结构的分离。XML 格式的文档通常包含一个文档类型说明，对数据的表层结构进行详细的描述。因为仅仅对结构进行严格约束，不包含特定的保留字或预定义的术语集，所以 XML 足够灵活，可以作为一种有效的数据表示和交换格式，在各种应用程序中进行数据的交互。由于缺乏预定义的术语集，XML 对文档没有任何语义约束，无法解决 LCI 数据跨平台、跨软件的共享问题。

## 2.2.3 RDF/RDFS

在 XML 的基础上，资源描述框架（RDF）和 RDF 模式语言（RDFS）定义了一组用于描述资源类型和属性的术语集，实现了语义层的普遍层次的描述<sup>[44]</sup>。

RDF 是语义 web 的基础框架，其语法核心是主谓宾三元组，它通过谓语将主语和宾语连接，形成一个 RDF 图。RDF 图是节点与弧构成的有向弧图，主语和宾语是有向弧图的节点，弧代表的是谓语，任何一个三元组都可以用这种有向弧图表示。人们可以利用 RDF 这种资源描述框架描述任意的事物，且整合事物的描述可构建出统一模型。被描述的事物称为资源，资源可以指代任何东西，包括事物、文档、抽象概念、数字、

字符串等。其中，事物、文档、抽象概念通过对象引用进行表示，对象引用通常使用 URI 进行标识。数值、字符串等使用字面量进行表示。除了引用对象和字面量之外，资源描述框架中还存在哑元节点，哑元节点不表示特定的资源，而是用来指代匿名资源。涉及哑元节点的三元组表示存在具有给定关系的事物，但没有明确命名。

RDF 可以表示任意两个数据间的关系，为数据的合并提供了一种简单的模型。通过三元组的方式解决了多源数据表达上的不一致问题，但是 RDF 无法弥补数据之间固有的差异。基于语义 Web 的特点，在知识推理规则的作用下利用指定 XML 元数据标记链接，最终可构建出适用于不同场合的本体。

#### 2.2.4 OWL

在语义模型体系结构中，网络本体语言（Web Ontology Language, OWL）用于描述本体的数据<sup>[45]</sup>。本体是根据想要研究的特定领域进行一组概念的抽象，通过本体论方法建模，将研究领域的感兴趣的各种事物抽象成计算机领域常说的类和属性，在本体内表现为概念以及概念之间的关系。

基于 RDF/RDFS，OWL 增加了大量用于描述属性及类型的词汇，以及关于集合运算、基数限制的词汇，用来表示特定领域之中基本概念、属性及概念间复杂关系，这些概念、属性和关系的声明构成特定领域中的术语集，从而使得语义有更强的知识表达能力及推理能力。

本体领域包含 5 个基本术语：类（概念）、实例、关系、函数和公理。基本术语可用五元组表示：其中分别代表类、关系、函数、公理及实例。类（概念）是组成本体结构的基本单位，其代表特定领域中的概念。类的本质是一个概念集合，其可以表示领域中任何事物或过程，如：功能、组成结构和策略等。实例是概念类的对象，而类可视为对应实例的集合，实例具有所属概念类的全部属性。关系描述了特定领域中类之间的交互作用，其对应于对象原则的集合。在本体领域中存在 4 种基本关系：kind-of、instance-of、part-of 和 attribute-of，分别用于描述类间继承关系、实例与类所属关系、整体与局部关系、属性和所属概念关系。函数是有特定规律的特殊关系。根据已知的前 n 个元素，可根据函数关系或相关规律推出第 n+1 个元素。公理是论述本体结构层次的工具，它表示永真且不必验证的真理。5 个基本术语和 4 种基本关系在本体构建过程中不一定都存在，要根据本体构建的领域、服务对象等合理构建。

#### 2.2.5 SWRL/SQWRL

语义网规则语言（Semantic Web Rule Language, SWRL）是 W3C 制定的一种语义网规则，由 RuleML<sup>[46]</sup>(Rule Markup Language, 规则标记语言)的不断演变和 OWL 本体论

的影响发展而成的<sup>[47]</sup>。SWRL 规范和 OWL 本体规范保持一致，但其表达能力是高于 OWL 语言的，SWRL 在 OWL 基础上增加了一系列更有表达力的词汇，这些词汇专为推理使用。Antecedent 是 SWRL 规则的前提条件，SWRL 的推理结果用 Consequent 表示，Antecedent 与 Consequent 都是由基本组成部分原子（Atom）所组成的。原子可以由一元谓词（类/数据类型）、二元谓词（属性）、等式/不等式或内置函数组成。

在查询方面，语义 Web 查询语言有两种：基于 RDF 的 SPARQL 查询语言<sup>[48]</sup>和基于 OWL 的 SQWRL 查询语言。SPARQL 查询语言与 RDF 结构紧密相连，根据 RDF 图产生的图模式，可以查询各节点信息。与普通的 Sql 查询语言不同，SPARQL 除了可以查询数据对象的属性内容，还可以查询数据包含的属性名称。但是 SPARQL 缺乏对于逻辑规则的处理能力，导致其查询结果不一定精确。语义网查询增强语言(Semantic Query-enhanced Web Rule Language, SQWRL)是基于 OWL 的查询语言，也是最常用的语义 Web 查询语言<sup>[49]</sup>。SQWRL 基于 SWRL 完成操作符的扩展，通过规定特定的运算符，可以实现语义查询的目的，因此 SQWRL 具有准确性高的优点。

### 2.3 LCSI-DS 模型框架设计

本文开发的 LCSI-DS 平台一方面需要存储清单数据，实现产品清单计算的基本功能，另一方面需要存储产品清单数据的语义模型。根据清单数据和语义模型，实现产品清单数据的语义表示，将语义表示的本体实例传入推理机，向用户提供语义清单服务。基于上述功能需求，建立的平台的模型框架如图 2.3 所示。

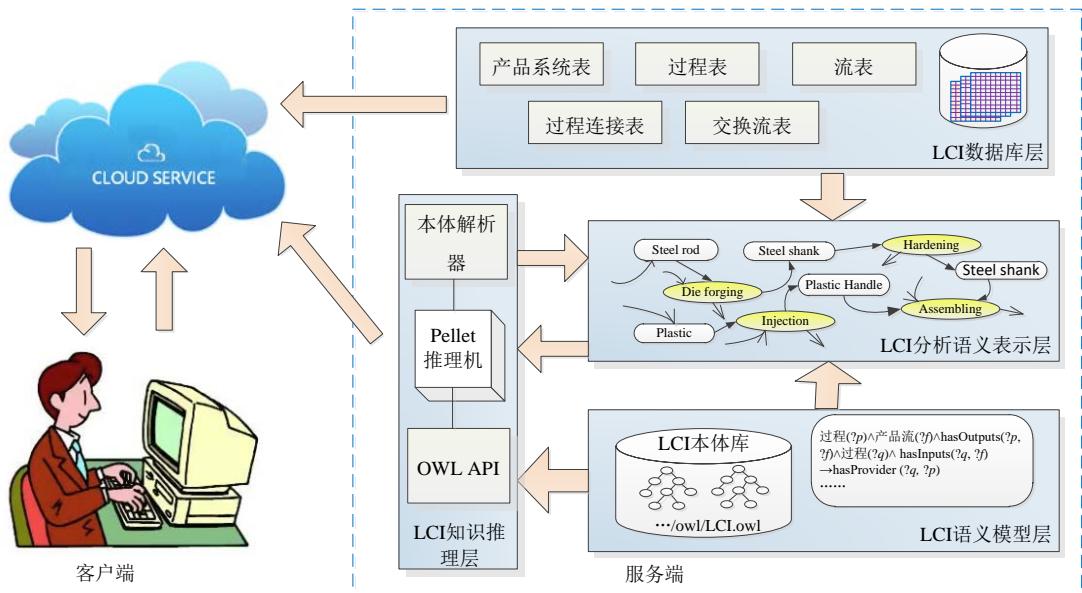


图 2.3 清单分析语义建模系统框架

Fig. 2.3 diagram of LCI analysis semantic modeling system framework

建模框架由如下 5 层结构组成：

(1) 产品 LCI 数据库层

产品 LCI 数据库层提供对产品 LCI 分析的数据支持。产品 LCI 数据库以相关标准为基础，采用 MySQL 关系型数据库系统管理的系统单元过程 LCI 数据，满足生命周期评价的要求。该数据库包括单元过程表、交换流表、物质流表、单位表等 20 多张表，数据主要来源于 Ecoinvent 数据集，包括物料过程，能源过程和部分运输过程的详细清单数据。通过转换程序导入。此外，数据库支持企业生产的 BOM 数据的导入。

(2) 产品 LCI 分析语义模型层

产品 LCI 分析语义模型层定义和构建面向机产品制造的 LCI 语义模型。包括一个 LCI 本体模型和一个语义知识规则库。本文采用 Protégé 5.5<sup>[50]</sup>本体建模工具软件构建本体模型，目前已定义近 120 个类和 30 个对象属性，保存为 XML/OWL 格式；采用 SWRL 语言定义语义知识规则库。

(3) 产品 LCI 分析语义表示层

产品 LCI 分析语义表示层记录和保存产品 LCI 分析的结果。产品的 LCI 建模与语义建模可以同时进行。在对产品系统进行 LCI 建模时，产品系统所关联的过程和流自动构建相应的本体实例。根据 LCI 建模时包含的关系，系统会自动标记建模的过程和流实例并记录它们之间的属性关系。建模的过程和流实例通过属性关联在一起，并形成基于本体的 RDF 图。将产品 LCI 分析的单元过程、产品流等信息通过 RDF 知识图谱表示出来，为后续产品清单计算、语义查询和环境资源问题追溯等应用提供基础。

(4) 语义和知识推理层

语义和知识推理层提供本体解析、LCI 分析知识图谱生成、语义和知识推理等信息服务。本文采用 Java 环境下的 SWRL/SQWRL 开源 API 库，实现查询应用程序与 SQWRL 引擎之间的接口连接，实现语义推理、语义查询等。SQWRL 引擎采用 Pellet 推理机，通过加载语义模型层提供的 OWL 本体模型和 SWRL 知识规则，对语义表示层中的分析实例进行语义查询。

(5) 用户交互层

用户交互层是用户与系统交互联系的接口。本文采用动态云下的微服务架构，客户端浏览器进入。服务端将数据库管理程序和语义推理层程序集成在一起，提供与产品 LCI 数据进行绑定的语义接口，最终可以对本体模式进行标准化、统一化。用户交互层提供基于产品生命周期清单数据的两种服务：一是产品 LCI 分析语义建模。本体模型定义了产品 LCI 分析语义建模的概念和关系，同时为交互层界面提供信息选择模板，包括产品系统、过程和产品流。二是提供产品 LCI 数据语义查询工作。

## 2.4 开发平台相关技术

本文开发平台采用 B/S (浏览器/服务器) 结构，使用上海湃睿信息科技有限公司提供的 Tundra 平台完成代码的开发。Tundra 平台基于 Springboot 的框架，使用 Vue 框架实现网页端和服务端数据的交互，使用 Spring data 提供的 JPA 框架完成服务端和数据库数据的交互。

### 2.4.1 B/S 模式

B/S 结构是一种将浏览器视为客户端的网络结构模式。随着科学技术发展，B/S 模式架构已经成为软件开发领域的主流开发模式。B/S 核心业务逻辑功能都由部署在服务端的代码实现，网络服务端连接并维护一个数据库。用户只需安装一个浏览器，如 Chrome、Firefox 等，即可完成页面渲染和用户数据交互等工作。这种结构通过浏览器就可以实现服务器和内部数据库的交互，因此软件开发人员更关注服务端的实现。

B/S 架构由客户机、应用服务器以及数据库服务器三部分组成。客户机对应的表现层作为 B/S 架构的第一部分，它实现的主要功能包括：辅助使用者与后端数据库完成数据信息交互工作以及软件开发工作完成后进行数据展示工作。应用服务器对应的表现层的开发模式为 MVC，M 代表业务模型，V 代表视图，C 代表控制器。数据库服务器对应的业务逻辑层作为 B/S 架构的第二部分，辅助服务器完成关于客户机业务的响应工作，故业务逻辑中间层也得以实现。数据层作为 B/S 架构的第三层，完成的主要工作为：实现服务器处理后的数据的交互及存储过程。B/S 模式简化了平台的开发和部署，同时统一了客户端不用下载和安装任何特殊软件，一个常用的浏览器就可以实现基本操作。B/S 架构的优点包括：兼容性好，硬件环境要求不高；易于操作；维护和开发成本较低；使用范围十分广泛。因此本次研究中选用 B/S 架构作为开发模式。

### 2.4.2 SpringBoot 框架

SpringBoot 框架是 Spring 的一个子项目，由 Pivotal 团队提供并维护。Spring Boot 框架所遵循的“约定优于配置(ConventionOver Configuration)”思想，通过注解驱动类简化了 Spring 项目的环境配置、初始搭建、各种依赖注入配置文件<sup>[51]</sup>，优化了 Spring 框架的 XML 文件，可以实现“零 XML 配置”的极简开发<sup>[52]</sup>。因此 SpringBoot 有配置简单、开发容易、轻巧灵活的优点。此外，Spring Boot 实现了 HTTP Restful 风格的开发，使得服务接口可以暴露出来，业务系统的服务化得以实现，使前后端分离操作成为可能。

SpringBoot 框架是基于 Java 编程语言的开源式的轻量级框架，其为开发工作做出以下贡献：

- (1) 该框架支持控制反转特性，结合依赖的导入可以实现对象生命周期化。

- (2) 基于该框架可以衍生和拓展出多种优秀框架，从而可以更好地完成开发工作。
- (3) 可采用多种优秀的数据持久化技术来实现对数据的访问。
- (4) 通过切面编程这种方式来实现声明式的事务管理。

#### 2.4.3 Vue.js 框架

前端开发不局限于只开发几个静态界面，现阶段前端开发人员不仅需要开发美观且友好的用户界面，还需要完成复杂的界面逻辑设计。前端开发技术的繁荣发展促使大量前端开发框架的诞生，市场主流的前端框架有 Angular.js<sup>[53]</sup>、React.js<sup>[54]</sup>和 Vue.js<sup>[55]</sup>，目前主流的前端框架多基于 MVVM 模式进行开发。MVVM<sup>[56]</sup> (Model-View-ViewModel) 是传统的 MVC (Model-View-Controller) 框架<sup>[57]</sup>的改良，这种方式的主要原理为：View 上的数据变化可实时地从 ViewModel 层更新到 Model 层，且又通过双向数据绑定方式，将更改后的数据动态地更新到 View 层，实现前端页面的更快捷的开发与维护。

Vue 框架是一种渐进式的前端框架，是目前主流的前端开发框架之一。它的开发核心为组件化和数据绑定。组件化提升了开发的效率、大大减少开发人员的工作量，其体现的是一种代码重用的思想，将需要重用的代码进行封装，再为封装好的代码注册标签，从而再次用到相同代码时直接调用即可。Vue 框架主要具有轻量级、高性能、灵活性的特点，可实现前后端分离，该操作使前端的开发工作由串行变成并行，因此可以大大地提升开发效率。前端代码主要完成界面渲染和某些界面交互逻辑这两项工作，并且 Vue 框架的具体开发方式为自底向上，这种开发方式决定了在开发过程中需要重点关注视图层。相比于其他前端开发框架，Vue 框架易与第三方 JavaScript 库结合、并且可以跨平台使用，故本次研究中采用 Vue 作为前端开发框架。

#### 2.4.4 Spring Data JPA

基于 Java web 的软件开发中，都涉及对数据库的访问技术。随着技术和用户需求不断地演变和提升，传统的 JDBC 技术早已不能用于开发和维护复杂的项目应用。

JPA 的全称是 Java Persistence API，它的主要作用是可持久化存储 Java 对象。JPA 实质是一种常用的 ORM 规范，并未具体给出 ORM 的实现，故它通常只可以提供一些规范和 API 编程接口。JPA 有很多优点：

- (1) 标准化。在不同的 JPA 框架中使用相同的 API。
- (2) 便捷易用。借助 javax.persistence.Entity 在该框架下构建实体。
- (3) 卓越的查询能力。由于该框架定义了自己特有的面向对象的 JPQL 查询语言，所以它有优秀的查询能力。
- (4) 支持高级属性。JPA 框架可实现类的继承、类之间的关系等面向对象的属性。

Spring Data 的主要作用是向研发人员提供更便捷的数据访问服务，它支持各种常用的数据库系统，如 MySql，Oracle 等。开发人员在持久层接口声明完成后，借助 Spring Data 这个工具，可以自动完成实体类的创建等工作。Spring Data JPA 给出了 JPA 的一个开源的实现框架，即 spring Data JPA。spring Data JPA 不仅支持普通的 SQL (Structured Query Language, 结构化查询语言) 查询、对象关系映射，还可实现动态编写 SQL 语句，从而开发人员的工作量大大减轻。spring data JPA 开发门槛低，运行灵活性高。考虑到学习成本、开发效率及软件的可扩展性，本文使用 spring Data JPA 框架作为持久层框架。

## 2.5 本章小结

本章主要介绍了与课题相关的理论及技术，旨在为 LCSI-DS 的开发奠定理论与技术基础。首先，本章介绍了生命周期评价的基本理论以及清单数据的格式。然后，对语义 Web 相关的知识和技术进行了介绍，包括：URI、XML、RDF/RDFS、OWL、SWRL/SQWRL，本次研究选用 OWL 作为本体描述语言，SWRL 作为规则描述语言。最后，确定 LCSI-DS 采用 B/S 架构，使用 Spring Boot 框架简化开发流程，采用 Spring Data JPA 技术实现服务端与数据库的交互，使用 Vue 框架完成前端页面的渲染和数据的交互。

### 3 产品 LCI 数据模型及数据库设计

#### 3.1 基于过程的产品 LCI 数据模型

在目前的 LCI 方法中，主要分为两种方法：基于过程的 LCI（Process-based LCI, PLCI）和经济投入产出 LCI（Economic-input output LCI, EIO-LCI）。PLCI 主要用于对产品实际过程的输入输出流的系统分析和建模，获取每个单元过程的输入输出清单数据。EIO-LCI 是从经济学中演变过来的方法，通过行业统计数据计算产品涉及行业对相关环境影响。ISO14040 标准主要针对的是 PLCA。在 PLCI 分析过程中首先将一个实际过程抽象为一个单元过程，再根据单元过程收集输入输出数据，进而得到研究对象的清单数据。本文按照 ISO14040 标准，采用 PLCI 方法进行 LCI 分析建模。

机械产品全生命周期一般会经历材料和能源生产过程、零部件生产过程、产品运输过程、产品使用过程和产品后置处理过程等，如图 3.1 所示。过程与过程之间通过产品流连接起来，过程与环境之间通过基本流连接。

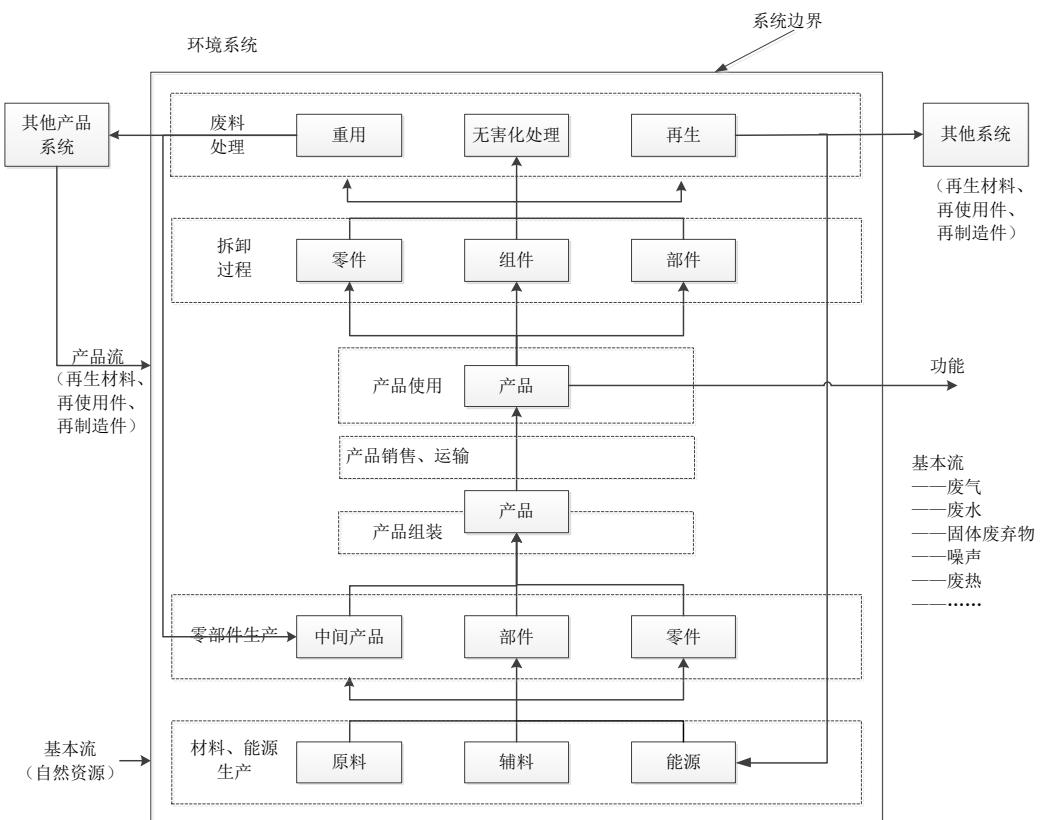


图 3.1 机械产品全生命周期过程

Fig. 3.1 Life cycle processes of mechanical products

基于机械产品结构及生产过程特点分析，本文提出如下两层产品 LCI 数据模型：

### (1) 产品过程链分析数据模型

LCI 分析是面向产品全生命周期，采用基于过程的 LCI 方法，需要对产品的全生命周期离散为不同阶段的各个过程，过程与过程之间通过产品交换流连接，形成一个产品过程链。如图 3.2 所示。

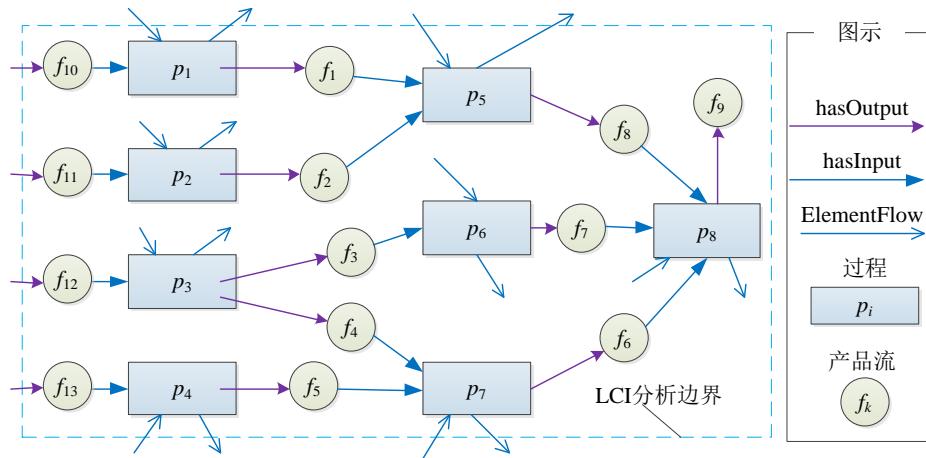


图 3.2 产品过程链 LCI 分析数据模型

Fig. 3.2 Diagram of Product process chain LCI analysis data model

### (2) 产品装配层次树分析数据模型

机械产品与材料产品和能源产品不同，一般是由多个零部件组成，很多零部件还属于外购件，这些零部件组成一个装配层次树。在对复杂机械产品 LCI 分析中，完全采用上述产品过程链 LCI 分析数据模型，数据关系比较复杂和混乱，环境问题追踪困难，清单分配等问题。为此，本文提出一个产品装配层次树分析数据模型，如图 3.3 所示。

产品装配层次树分析数据模型，与产品装配关系模型类似，易于将产品 BOM 导入后自动构建产品过程链模型。LCI 分析层次结构清晰，可以开展并行的复杂机电产品 LCI 分析。

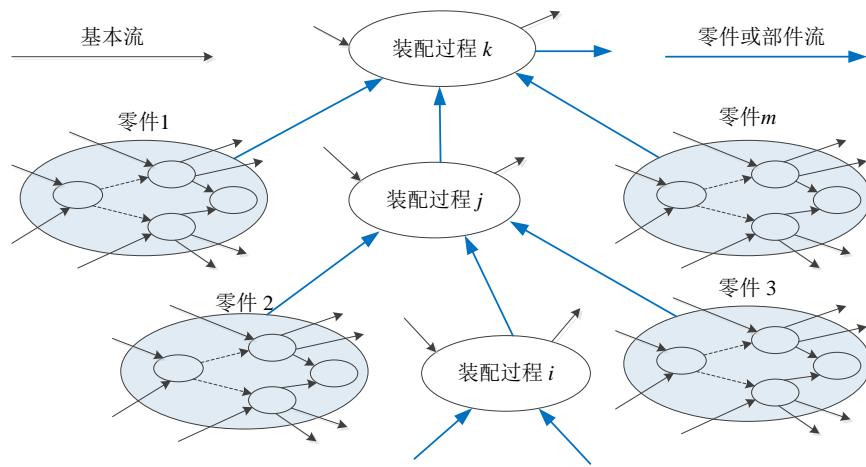


图 3.3 产品装配层次树分析数据模型

Fig. 3.3 Diagram of Product assembly hierarchical tree analysis data model

### 3.2 产品 LCI 数据库设计

在对产品的生命周期清单数据进行建模时，可以将生命周期涉及的领域分为技术领域和环境领域。技术领域是指人类参与的所有生产活动，通过对产品目标与范围的确定，可以划分出技术领域的系统边界。通过对产品的清单进行汇总，可以得到技术领域内人类活动、产品的清单数据<sup>[58]</sup>。环境领域主要关注生产活动对环境可能产生的潜在的影响，如机械加工直接或间接产生的二氧化碳对区域环境造成的影响。此外，还有决策者对技术领域和环境领域的价值标准，称为价值领域。不同的政府、组织对环境变化的态度或观念不尽相同，人类在选取领域信息时，主要是基于价值取向、政治因素和累积的经验。产品生命周期数据库将这些信息进行存储和检索，为产品全生命周期评价提供所需的基本数据。

产品全生命周期清单数据是对实际产品过程与环境交互的抽象，数据库设计包括客观世界需求分析、概念模型设计、数据库逻辑结构设计和物理结构设计。对于产品全生命周期清单分析，客观世界分析涉及产品的技术领域和环境领域，概念模型设计通过对用户需求进行综合、归纳与抽象，形成一个独立于具体数据库管理系统的概念模型；逻辑结构设计将概念结构转换为数据库管理系统所支持的数据模型，并对其进行优化；物理结构设计为逻辑数据结构选取一个最适合应用环境的物理结构，包括存储结构和存取方法，通常物理结构设计由数据库管理系统完成。本文工作主要涉及前三类结构设计，如图 3.4 所示。

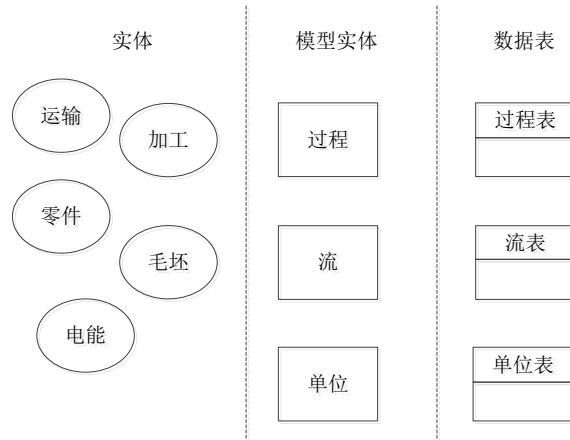


图 3.4 数据库设计过程  
Fig. 3.4 Diagram of database design process

### 3.2.1 技术领域的数据集

技术领域是指人类参与的所有生产活动，根据机电产品清单分析的要求，技术领域中的实体主要由单位管理、流管理、产品系统管理及过程管理四部分组成，技术领域的各实体之间是相互联系、相互影响的。技术领域的主要实体总体上可分为四部分：单位实体、流实体、过程实体、产品系统实体，这四部分结构是相互联系的。下面将采用的实体模型进行简要的介绍：

#### (一) 单位实体

单位是产品 LCI 数据库中最基础的实体。单位实体是用来描述机电产品涉及的各种数量的测量单位，例如焊接时排放 CO<sub>2</sub>的质量、车削加工走刀量的长度、机械产品总装后产品的个数等。根据度量的物理量不同，可以将单位分为质量、能量、长度、数量等不同的单位组。同一单位组中的单位可以进行换算，在每个单位组中，选定一个单位作为所有单位转换的基准，这个单位称为该单位组的基准单位，基准单位在同一单位组中可以进行改变。例如：在长度单位组中，可以将米作为基准单位，其他长度单位如千米、毫米、丝米都以米为基准定义转换因子。单位和单位组的实体模型如图 3.5 所示。

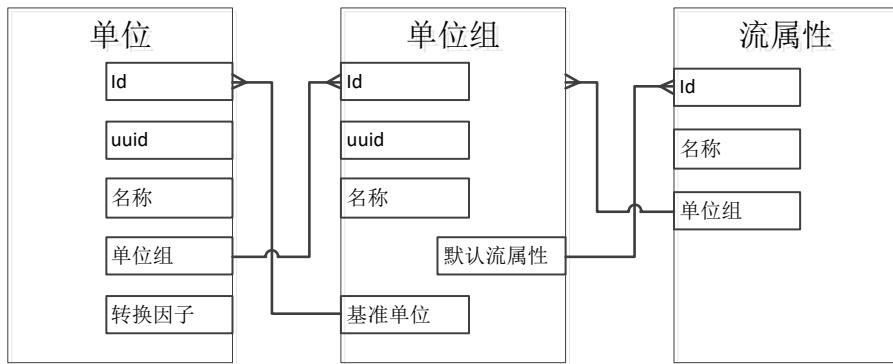


图 3.5 单位和单位组实体模型  
Fig. 3.5 The entity model of the unit and the unit group

## (二) 流实体

流是机电产品生命周期范围内涉及的各种产品、物质或能量的统称，是技术领域的基础性数据。根据流与技术领域的关系，可以将流分为基本流和产品流。基本流是指那些取自环境的，未经过加工或者人为二次转换的，其边界为进入系统边界前的那些物质或能量，或者是离开系统边界的那些也不再进行加工或者二次转换的物质或能量<sup>[59]</sup>。产品流是指人类活动产生的产品、服务等，包含进入或离开所研究系统的产品、服务及中间流。产品系统中的基本流和产品流如 3.1 节的图 3.1 所示。

抽象“流”这一实体概念十分重要，一方面，流包含一些独立的信息，将这些独立于过程的流信息单独存储，可以减少数据的冗余，当过程需要流构成输入输出时，可以将过程的交换流与流进行关联。另一方面，流是进行生命周期评价的基础数据，生命周期过程中的环境影响特征化因子以及清单分析结果生命周期清单分析结果都与流有密切的联系。如果一个流有多种表示方式，那么以流作为基础数据的清单分析结果和环境影响的特征化因子对应的结果会受到很大影响。如 45 钢，可用 45、45#、C45 等多种方式表示，如果清单分析中 45 钢的表示方式与评价方法中的 45 钢的表示方式不一致，会对计算结果产生偏差<sup>[60]</sup>。流表主要用于描述流的基本信息，对于基本流来说，基本信息还包含 CAS 编码，化学式等。

对于同一个流，可以从多种角度描述它的属性，如物理角度、含量角度和经济角度。例如：长度为 1m 的 70 钢管质量为 7.85kg，其中，长度和质量都是表示 70 钢管物理方面的属性，除此之外，可以描述流含量方面的属性，例如碳含量、钛含量等。流属性是一个独立的概念，可以独立于流而存在，因此将流属性抽象为一个实体。对于具体的流，它的属性值是确定的，当选定一种属性作为描述该物质的基准时，其他属性可以根据比例关系进行换算。因此抽象出流属性因子，作为流和流属性之间的连接，其用于存储流的属性因子。流涉及的实体模型如图 3.6 所示。

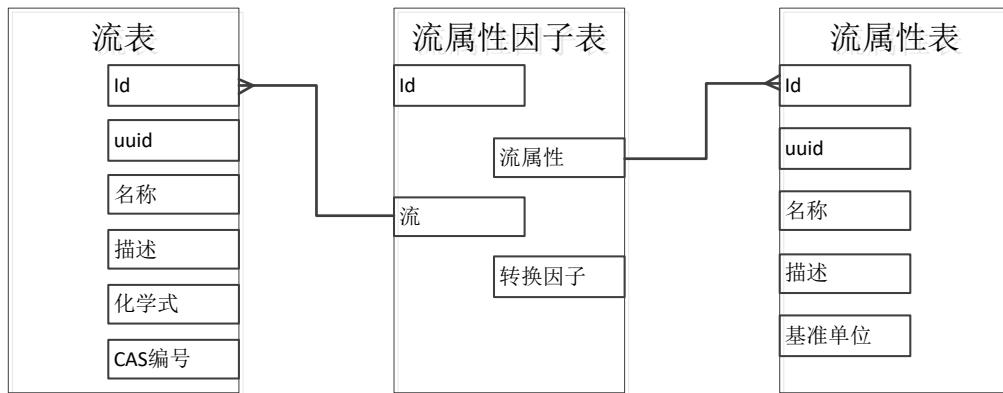


图 3.6 流实体模型  
Fig. 3.6 The entity model of the flows

### (三) 过程实体

过程本质是一系列从输入到输出的相互影响、关联、作用的活动，是技术领域中的核心模型。根据定义，人类技术领域的所有活动，都可以划归到过程的范畴。在机械制造领域，产品生命周期范围内涉及的过程主要包括：

- a) 原材料的获取过程（包括常见的各种工程材料的开采和生产过程）；
- b) 辅助材料的获取过程（包括冷却液、切削液等加工过程的辅助材料和木材等包装材料）；
- c) 能源生产过程（如煤、油、燃气、电、耗能工质等）；
- d) 毛坯制造阶段（如加工制造过程中需要的各种型材、注塑件和铸件等毛坯件）；
- e) 零件的加工制造阶段（主要包括各种机械加工过程及表面处理过程）；
- f) 机械产品装配过程；
- g) 废弃物的回收处理阶段（如在切削加工过程中产生的切屑、CO<sub>2</sub>、使用耗材及剩余原材料等）；
- h) 运输过程（主要指的是产品、原材料、零件、资源能源及废弃物等物质的运输过程）；
- i) 废弃物和剩余部件的循环利用阶段（如再制造阶段）

生命周期评价将生命周期的各个过程都抽象为一个个有一定联系的单元过程。单元过程是在量化过程中输入输出所涉及的最基本单元<sup>[61]</sup>，而流则具体指的是在各个单元过程中涉及的各种物质、产品和能量。例如，生产风电机组中的变桨系统需要 3 个变桨轴承，对这一过程进行分析时，将变桨轴承的制造过程抽象为一个单元过程，该过程输出 1 个变桨轴承。导流罩的生产过程可被抽象为一个单元生产过程，该单元过程需输入 3 个变桨轴承。过程包含很多输入输出的流，在实际生产中，制造加工的不同过程可能包

含相同流的输入输出，过程和流之间是多对多的关系。为了避免数据冗余，将过程和流之间的输入、输出关系抽象为交换流实体，交换流用于表征过程和流之间交换的方向和数量。每个单元过程都会产生一个主要产品，例如变桨轴承制造过程输出的变桨轴承、变桨系统装配过程输出的变桨系统。标识单元过程及其主要输出产品的交换称为基准交换流。通过与基准交换流的对比，可以得到单元过程其他交换流的数量信息。交换流是存储过程清单数据的主要实体。

机械制造过程涉及大量的参数信息、例如：车削加工时的切削深度、进给量、车床的功率等。过程中涉及的这些参数和输入输出流的数量具有一定的关联，在产品生产过程中，也会有产品范围内共用的参数。因此，将这些参数信息抽象为参数实体。通过使用参数，可以更为准确地描述单元过程与输入、输出流之间的数量关系，同时也为产品的参数化计算提供基础。

加工过程涉及的工艺路线、工艺技术水平等信息，与机加工参数不同，不涉及具体的输入输出，只是涵盖识别过程所依据的技术特性和特殊性所必需的信息。这些信息和具体的生产、制造过程一一对应，为了更详细地描述单元过程，将过程的这些信息抽象为过程文档，存储在数据库中。此外，过程的输入、输出数据可以从实际生产过程或者文献记录中收集而来的，机加工参数数据是实时采集的，而工艺路线、工艺技术水平等信息涉及的数据多为行业或领域平均水平的数据，有一定的不确定度。随着生产规模的扩大和生产工艺的改进，采集的过程数据也会随着制造技术及工艺的改进而发生相应改变，因此收集的过程数据具有时效性，这些信息以及收集这些信息的人员信息都需要存储在过程文档表中。过程涉及的实体模型如图 3.7 所示。

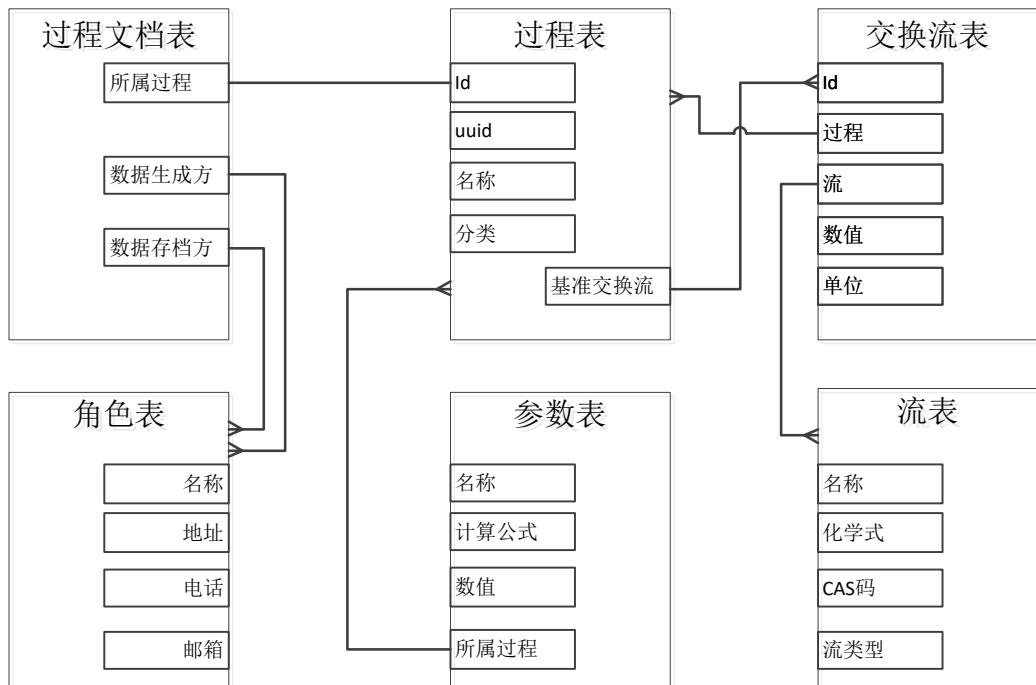


图 3.7 过程实体模型

Fig. 3.7 The entity model of the process

#### (四) 产品系统实体

产品系统管理主要包含两个实体：过程连接和产品系统。在分析机械产品时，将机械产品的生命周期建模为一个产品系统。与过程和交换流之间的逻辑类似，在产品系统内，为了确定每一个单元过程的数量信息，需要选择一个基准过程，根据生产的需要，其他过程通过与基准过程之间存在固定的比例系数。一般选取基准过程中一个产品输出流作为产品系统的基准流。通过设定产品系统的基准流和目标值，根据过程的连接，获取各个过程的比例系数，可以完成对产品系统数据的量化。

在产品系统的层次结构中，过程与过程之间通过产品交换流连接，形成一个产品过程链。如 3.1 节的图 3.2 所示。

各个单元过程的连接关系，可以通过过程连接实体进行表示。根据过程与中间产品的相互关系，可以将过程分为中间产品的提供过程和接收过程。过程连接实体以中间产品作为连接点，通过指定接收过程输入产品的供应方完成接收过程和提供过程之间的连接。图 3.8 是一个产品系统内体现过程连接的简单示意图。产品系统内部的连接是通过过程和流的交互实现的，一个提供过程的输出流是一个接收过程的输入流，而输入和输出在 LCI 数据中体现为 0 和 1，这意味着对过程连接的数据层方面来说，通过对交换流的定义，可以将一个带有方向（输入与输出）的过程连接持久化存储到数据库中。

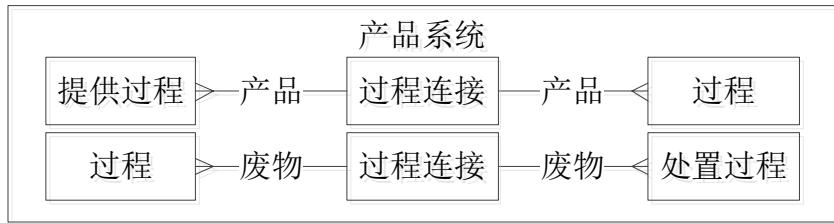


图 3.8 过程连接示意图

Fig. 3.8 The schematic diagram of the process link

分析多个产品的环境影响时，可以将多个产品系统作为一个工程。工程用于多个产品系统间的比较，不同的产品系统共用相同的影响评价方法，根据生成的影响评价结果，生成对比的报告。产品系统的实体模型如图 3.9 所示。

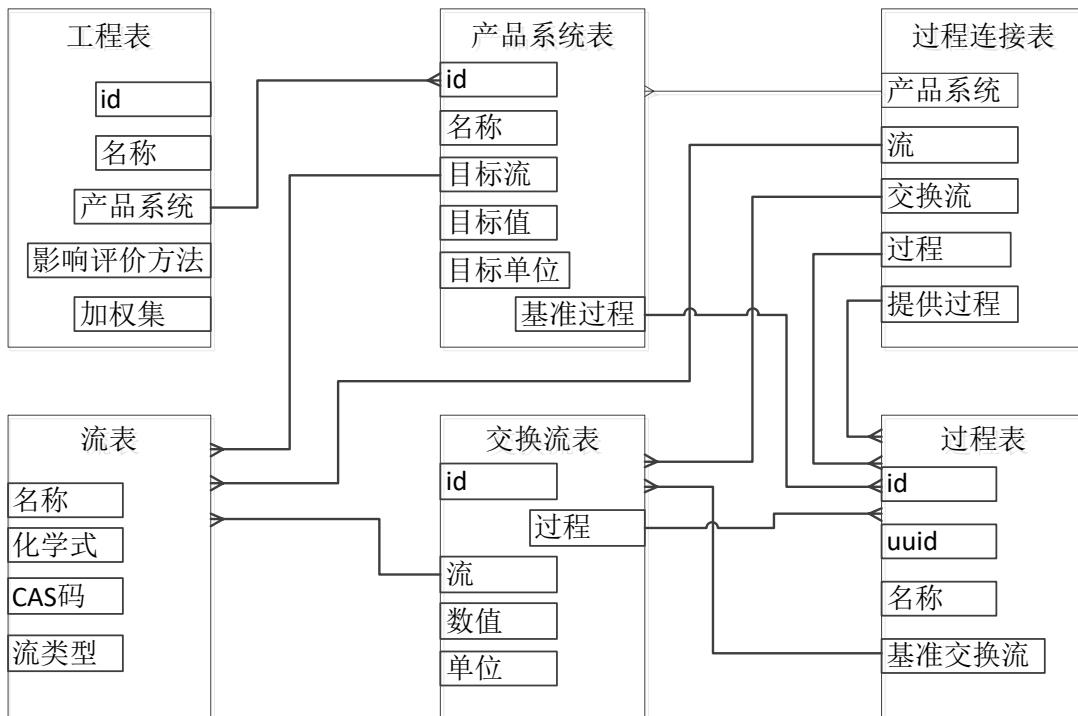


图 3.9 产品系统实体模型

Fig. 3.9 The entity model of product system

### 3.2.2 环境领域的数据集

环境领域的主要实体总体上可分为两部分：地理信息和环境影响。地理信息主要包括过程和流发生的空间地理位置，抽象为地理位置实体，主要包含国家、城市、经度、纬度等信息，过程和流包含地理位置的引用对象。

环境影响模型是环境领域最重要的模型，涉及多个实体，主要用于描述流对环境产

生的影响。根据国标 GB/T 32813-2016，环境影响包含的要素主要有影响类型、影响评价方法、特征化因子、归一化集合、权重集合。

影响类型具体指的是受到人们关注的各种环境问题的详细分类，清单分析的最终结果就可以归为影响类型。对于影响类型的定量化描述参数就是影响类型参数，简称类型参数。影响类型具有相应的特征化模型，使用特征化因子可以定量流对影响类型的影响大小。通过特征化因子，可以实现清单分析结果向类型参数共同单位的转换。

影响评价方法建立的目的是对备受人们关注的环境问题进行评价。国家、政府、企业根据自身的需求或关心的环境问题，选取不同维度的环境影响类型，制订出相应的影响评价方法。目前，常用的影响评价方法有 ReCiPe<sup>[62]</sup>。清单分析结果按照选取的影响评价方法，可以划分到相应的影响类型中。

在影响评价方法中，通过归一化、加权可以将不同的影响类型参数结果进行整合并。通过选择特征范围内的排放总量或资源消耗总量作为基准<sup>[63]</sup>，将影响类型参数结果进行归一化，其结果为无量纲的数值，表示在总的环境影响中占的比重。归一化计算公式如式 3.1 所示。

$$\bar{C}_{j,F} = \frac{C_{j,F}}{V_{B,j}} \quad (3.1)$$

其中：

$\bar{C}_{j,F}$ ：基于功能单位 F 的影响类型 j 的归一化结果；

$C_{j,F}$ ：基于功能单位 F 的影响类型 j 参数结果；

$V_{B,j}$ ：归一化基准值。例如特定范围内的排放总量或资源消耗总量；特定范围内的人均（或类似均值）排放总量或资源消耗总量等。

在影响评价方法中，权重因子表示影响类型的归一化结果在整个评价方法中的相对重要程度。在影响评价方法中，将影响类型的归一化结果进行加权求和，可以得到产品系统环境影响加权结果，作为产品生命周期范围内对环境影响的综合指标。

$$r = \bar{C}_{j,F} \cdot w \quad (3.2)$$

其中：

$r$ ：基于功能单位 F 的环境影响加权结果，也称环境影响潜值；

$w$ ：影响类型的加权值。

根据对环境的评价趋向的不同，影响类型的归一化、权重因子可以设置不同的值，将每一组归一化、权重因子作为集合进行存储，归一化/权重集合一方面与影响评价方法相关联，另一方面与具体的归一化/权重因子相关联，用于表示对指定环境影响类型的侧重程度。环境影响实体模型如图 3.10 所示。

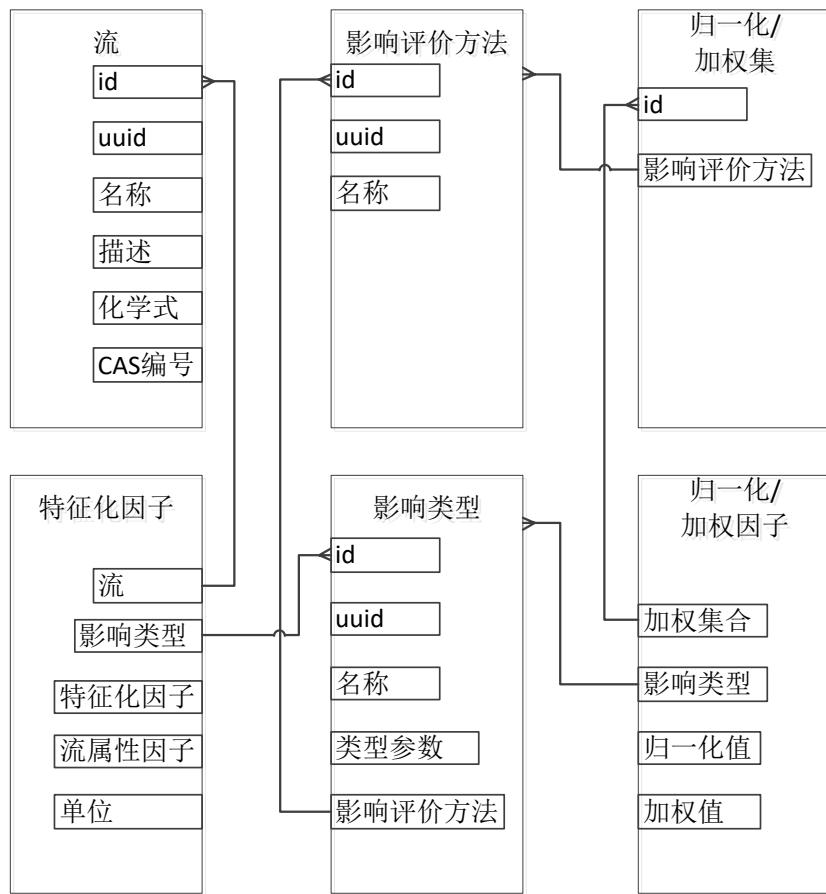


图 3.10 环境影响实体模型  
Fig. 3.10 The entity model of the LCIA

### 3.3 数据库实体关系表设计

选取 MySQL 为 LCI-EM 数据库管理系统软件, 采用 Spring Data JPA 技术<sup>[64]</sup>构建的实体模型表示为 LCI-EM 系统中表与表之间的关系。产品 LCI 数据库主要包含了两种类型的数据集, 即通用数据集和应用数据集。

#### 3.2.1 通用数据表设计

通用数据集用于存储独立于产品系统生产过程的数据, 主要包括流、流属性/流属性因子、单位组/单位、分类、地点和影响评价相关的实体。

##### (一) 流表

流是通用数据集最核心的实体, 也是产品系统应用数据集的基础。流表中流的基本信息, 以及和其他实体引用的外键, 主要字段如表 3.1 所示。

表 3.1 流表主要字段  
Tab. 3.1 Main fields of the flow table

字段	类型	说明
id	long	id 标识符
uuid	String	UUID, 用于不同数据集交互
name	String	名称, 用于规范流的名称
description	String	描述, 用于表示流的详细说明
type	FlowType	类型, 基本流、产品流、废物流
casNumber	String	CAS 编号, 精确识别化学物质
formula	String	化学式, 基本流的化学分子式
CategoryReference	ObjectReference	外键, 标识流所处的分类
flowPropertyReference	ObjectReference	外键, 标识流的基准属性
locationReference	ObjectReference	外键, 标识流所处的地理位置

## (二) 流属性与流属性因子表

流属性表存储的内容是用于规范流的所有属性信息, 包含名称、单位组、属性类型等字段。名称就是流属性的名称。单位组标识该属性相匹配的单位组。属性类型用于标识是物理属性、经济属性还是含量属性。流属性因子表用于关联流和属性, 存储流各种属性之间的转换因子, 主要字段如表 3.2 所示:

表 3.2 流属性因子表主要字段  
Tab. 3.2 Main fields of the flowpropertyfactor table

字段	类型	说明
id	long	id 标识符
flowReference	ObjectReference	外键, 标识流
flowPropertyReference	ObjectReference	外键, 标识流属性
conversionFactor	double	流属性因子

## (三) 单位组/单位表

单位组用以将不同的单位分类, 以方便单位进行换算。单位表用以存储机械产品生命周期清单数据库中的计量单位以及转换因子, 以便数据库中的其他表可以引用单位表中的表达形式和计量方式。单位表主要字段如表 3.3 所示:

表 3.3 单位表主要字段  
Tab. 3.3 Main fields of the unit table

字段	类型	说明
id	long	id 标识符
name	ObjectReference	名称, 规范单位的名称
unitGroupReference	ObjectReference	外键, 标识单位所属的单位组
conversionFactor	double	单位与基准单位的转换因子

#### (四) 地点表

地点表用来存储流、过程所发生的地理位置的详细信息, 如名称、国家、国家代码、城市、经度、纬度, kmz 信息等。

#### (五) 数据来源表

根据 GB/T 24040 系列标准的要求, 对 LCA 研究中的数据应当说明其来源, 从而保证 LCA 的透明性。因此, 在来源表中存储 LCI 数据的来源, 包含所参考的期刊、报告、作者、网址等相关数据。

#### (六) 影响评价相关表

环境影响评价过程将清单物质转化为指定的环境影响类别, 因此环境影响表包括了影响评价方法表、影响类型表、特征化因子表、归一化和加权表等。其中影响评价方法表用于存储常用影响评价方法的具体名称、类别及备注说明。影响类型表用来表征某种环境影响类型的名称、特征化模型、类型参数和当量单位。

特征化因子表用来存储流对影响类型的特征化因子。

表 3.4 特征化因子表主要字段  
Tab. 3.4 Main fields of the characterfactor table

字段	类型	说明
id	long	id 标识符
impactCategoryReference	ObjectReference	外键, 标识影响类型
flowReference	ObjectReference	外键, 标识流
value	double	特征化因子
formula	String	计算公式
flowPropertyReference	ObjectReference	外键, 标识流属性因子
unitReference	ObjectReference	外键, 标识单位
locationReference	ObjectReference	外键, 标识地理位置

归一化/权重集合表用于存储影响评价方法包含的不同数据。归一化/权重因子表用于存储归一化基准值和权重因子的数值，与影响类型关联，详细字段如表 3.5 所示。

表 3.5 归一化/权重因子表主要字段  
Tab. 3.5 Main fields of the nwfactor table

字段	类型	说明
id	long	id 标识符
impactCategoryReference	ObjectReference	外键，标识影响类型
nwSetReference	ObjectReference	外键，标识权重集合
normalizationFactor	double	归一化基准值
weightingFactor	double	权重因子

### 3.2.2 应用数据表设计

应用数据集用于管理研究范围内机电产品的过程数据和产品系统数据。

#### 一. 过程数据

过程数据涉及的表主要包括过程表、过程文档表、交换流表、参数表等。

##### (1) 过程表

过程是应用数据集最核心的实体，也是产品系统层级结构中的最小单元。过程表包含单元过程的基本信息以及引用其他实体的外键，主要字段如表 3.6 所示。

表 3.6 过程表主要字段  
Tab. 3.6 Main fields of the process table

字段	类型	说明
id	long	标识符
uuid	String	UUID，用于不同数据集交互
name	String	名称，用于规范过程的名称
description	String	描述，用于表示过程的详细说明
type	ProcessType	类型，单元过程、系统终止过程
processDocReference	ObjectReference	外键，标识过程对应的文档
CategoryReference	ObjectReference	外键，标识过程的分类
quantitativeReference	ObjectReference	外键，标识过程的数量基准
locationReference	ObjectReference	外键，标识过程所处的地理位置

### (2) 过程文档表

过程文档表涵盖识别过程所依据的技术特性和过程特殊性所必需的信息，主要包含过程的技术、管理以及数据建模验证信息。过程中的技术信息用于描述在整个过程中的技术信息及细节、过程起始和终止的边界、适用范围等。过程中的管理信息存储的内容为：过程中数据的创建时间、目的、使用的限制、版权、出版刊物、数据生成人员、存档人员等信息。过程中的数据建模验证信息包含建模过程中采用的物理变量、数据处理方式、取样方式、数据完整性和数据取舍准则、数据验证的审阅信息。

### (3) 交换流表

交换流表用以存储单元过程所包含的流的输入和输出，是保存具体数值的表。主要字段如表所示。

表 3.7 交换流表的主要字段  
Tab. 3.7 Main fields of the exchange table

字段	类型	说明
id	long	标识符
processReference	ObjectReference	外键，标识数据所属的过程
flowReference	ObjectReference	外键，标识数据关联的流
isInput	Boolean	表示交换的方向，输入/输出
resultingAmountValue	Double	过程和流交换的数量值
resultingAmountFormula	String	过程和流交换的计算公式
flowPropertyFactorReference	ObjectReference	外键，标识交换的数量属性
unitReference	ObjectReference	外键，标识交换的计量单位
currencyReference	ObjectReference	外键，表示交换的价值单位
baseUncertainty	Double	交换数量的不确定度
locationReference	ObjectReference	外键，标识过程所处的地理位置

### (4) 参数表

过程参数表存储了在不同国家和地区中的运输方式、距离和能源结构等主要参数。

## 二. 产品系统数据

生命周期评价模型的主要内容包括产品系统所有实体数据，本文中生命周期模型建立是依靠产品系统来完成的。产品系统由产品系统表、过程连接表和工程表等实体构成。

### (1) 产品系统表

产品系统表包含产品系统的基本信息，以及和其他实体引用的外键，主要字段如表

3.8 所示。

表 3.8 产品系统表的主要字段  
Tab. 3.8 Main fields of the product system table

字段	类型	说明
id	long	标识符
name	String	名称, 标识产品系统
description	String	描述, 表示产品系统的详细说明
processReference	ObjectReference	外键, 标识产品系统的基准过程
flowReference	ObjectReference	外键, 标识产品系统的基准流
cut-off	Double	表示产品系统的截断原则
targetAmount	Double	表示功能单位的数量值
targetFlowProperty	ObjectReference	外键, 标识功能单位的物理属性
FactoryReference	ObjectReference	外键, 标识功能单位的计量单位
targetUnitReference	ObjectReference	外键, 标识产品系统的分类
CategoryReference	ObjectReference	

## (2) 过程连接表

根据过程连接的实体模型, 过程连接包含的字段如表 3.9 所示。

表 3.9 过程连接表字段  
Tab. 3.9 Fields of the process link table

字段	类型	说明
id	long	标识符
systemReference	ObjectReference	外键, 标识连接所属的产品系统
processReference	ObjectReference	外键, 标识产品的接收过程
exchangeReference	ObjectReference	外键, 标识连接的交换流
flowReference	ObjectReference	外键, 标识连接的流
providerReference	ObjectReference	外键, 标识产品的提供过程

## (3) 工程表

工程表是用于比较具有相同功能的不同产品系统的有效工具。工程表用于存储不同产品系统、系统的功能单位、功能目标等。且工程表中还包含存储时间、名称、类别及创造者的有关信息。

### 3.4 清单数据计算

清单分析是为了计算产品在整个生命周期范围内资源的输入和废物排放的总量，为产品的环境影响评价提供清单结果。本文通过矩阵法实现对产品生命周期清单分析结果的计算。一般来说，对于两个相同的过程，如果它们的生产产出相同，那么它们对环境和资源的影响也应该相同。如果它们的生产产量不同，则它们的影响与生产产量成线性比例，这是 LCI 数据中的线性假设。基于线性假设，可以使用矩阵法计算过程的 LCI 数据。矩阵法线性计算步骤如下：

(1) 构造一个产品系统的所有单元过程的向量  $P$ 。设一个单元过程的过程向量为  $p$ :

$$p = (f_1, f_2, \dots, f_n) \quad (3.2)$$

其中  $f_i$  代表该过程输入/输出流的数值。

产品系统的所有单元过程可以表示为单元过程的集合，各个单元过程的所涉及的流不同，为了构建产品系统的矩阵，需要构建矩阵的索引。索引用于确定矩阵每行/列所代表的对象，规范数据对象之间的相互位置关系。构建索引后，各个单元过程按照相同的方法进行流数据表示，将规范后的单元过程向量进行组合，表示为产品系统的矩阵  $P$

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n) \quad (3.3)$$

(2) 将产品系统矩阵进行划分。根据流和产品系统边界的关系，可以将流分为产品系统内部的中间流和跨越产品系统边界的边缘流。产品系统内部的中间流用于产品系统中各个单元过程之间的连接，每一个中间流都可以唯一地联系一个提供过程，因此，中间流是传递线性关系的重要纽带。边缘流在产品系统边界范围内不产生连接关系，所以不决定单元过程的线性关系。根据这一特点，将产品系统矩阵分为由中间流组成的技术矩阵  $A$  和由边缘流组成的干预矩阵  $B$ ，分别构建技术矩阵  $A$  的索引和干预矩阵  $B$  的索引。

(3) 设定产品系统的需求向量。需求向量用于记录所需求产品的数量。一般以生产单个功能单位  $F$  的产品作为产品系统的最终需求，功能单位对应流数量置为 1，其他中间流的数量置为 0，将需求向量表示为  $f$ 。矩阵  $A$  与向量  $f$  有对应的比例因子向量  $s$ ，则  $A$  与  $f$  之间的关系可表示为

$$As = f, s = A^{-1} \cdot f \quad (3.4)$$

(4) 用清单分析结果向量  $g_F$  表示基于功能单位  $F$  的资源消耗和环境排放结果。同样，根据线性假设，干预矩阵  $B$  与清单分析结果  $g$  的关系为

$$B \cdot s = g_F \quad (3.5)$$

根据比例因子向量，得到最终的为清单分析结果向量， $g_F$  可表示为

$$g_F = B A^{-1} f \quad (3.6)$$

(5) 根据计算得到的基于功能单位  $F$  的生命周期清单分析结果  $g_F$ ，可以计算清单结果

对环境的影响。清单分析结果中的每一个流对环境都有一定的影响，选定一种影响评价方法，可以构建出清单结果和环境影响类型的环境影响矩阵 $Q$ ，根据清单分析结果与环境影响矩阵相乘，可以得到影响类型参数结果 $c_F$ ：

$$c_F = g_F \cdot Q \quad (3.7)$$

根据影响评价方法中确定的影响类型的归一化基准 $\nu$ 和权重因子 $\mu$ ，可以对影响类型参数结果进行合并<sup>[65]</sup>，从而可求得产品系统环境影响加权结果 $r$ ，具体计算方法见3.2.2节的式3.2。

矩阵和向量的计算根据线性代数运算实现，下面主要说明索引的构建和矩阵数据的填充。产品系统的技术矩阵和干预矩阵所涉及的数据都存储在数据库中。将数据库中的数据填充到数学矩阵中时，需要指定这些数据在矩阵中的位置。在数据库模型中，交换流表中存储了过程、流和数量信息。在矩阵模型中，列代表过程，行代表流，为了将这两个模型的数据进行对应，需要构建关于矩阵行和列的索引。根据矩阵的分类，索引可以分为技术矩阵索引和干预矩阵的索引。在技术矩阵中，中间流和中间流的提供/处置过程是一一对应的，因此技术矩阵中的行和列可以用同一组索引表示，称为技术索引。干预矩阵和技术矩阵的过程相同，因此可以使用技术索引作为干预矩阵的列索引。干预矩阵的行索引用规范边缘流的相互位置关系，称为流索引。

以技术索引为例，说明矩阵索引的构建逻辑。

考虑到单元过程除了输出主要产品外，还有可能存在共生产品的输出，为了索引中的元素和过程、产品更准确地关联，索引中的元素将单元过程按输出的产品进行标识。将产品及其提供过程作为一个整体对象作为索引的元素类型。以产品系统的基准过程进行初始化，基准过程和基准产品作为技术索引的第一个元素，通过获取产品系统的所有连接过程，生成技术矩阵索引。技术索引的生成流程如图3.11所示。产品系统需求向量和技术矩阵共用一个索引，可以解释为产品的需求向量，在进行机械产品系统分析时，需求产品一般为生产单个功能单元，即单个基准流，此外，需求产品及其数量信息可以通过产品系统的目标产品和目标数量进行自定义设置。

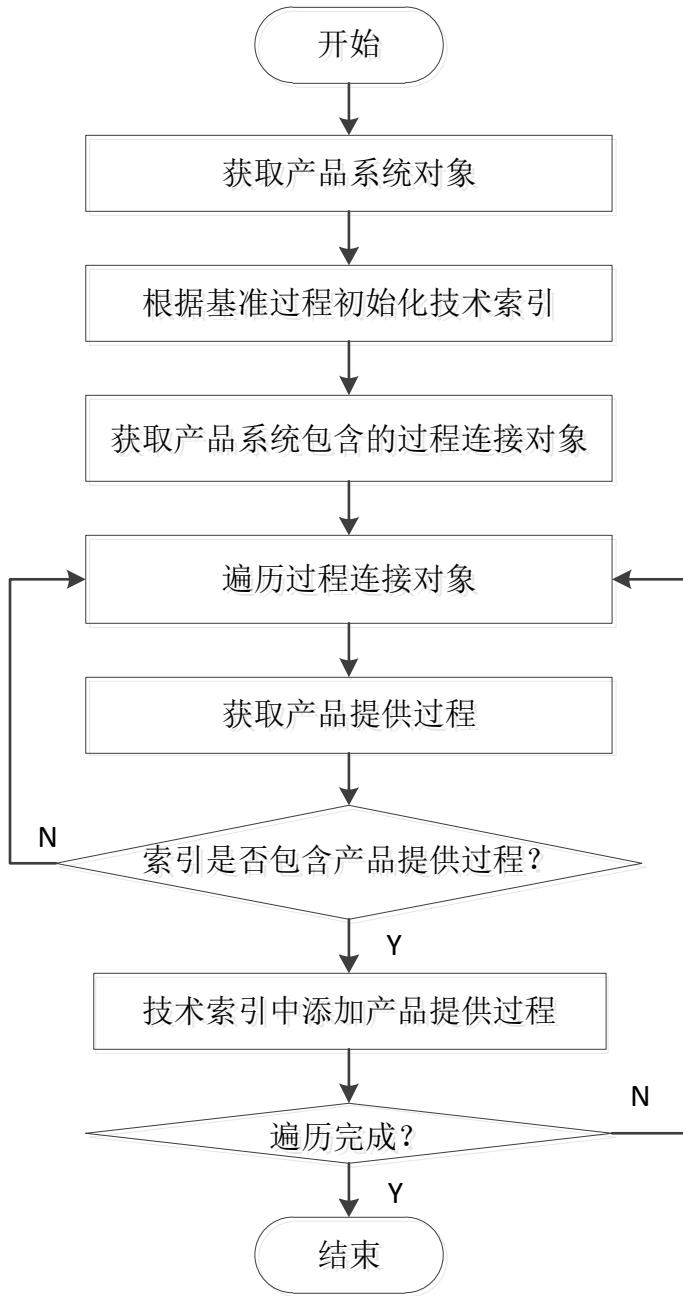


图 3.11 技术索引生成流程

Fig. 3.11 Diagram of Technical index generation

索引构建完成后，可以将过程的交换流数据记录，按照技术索引、流索引填充到相应的技术矩阵、干预矩阵中。在填充数据时，交换流中表示物质的单位可能不同，例如对于 CO<sub>2</sub>，交换流中记录中可以使用体积单位（立方米），质量单位（千克、吨）等，如果矩阵中同一个流的单位不同，矩阵运算的结果也会出现偏差。因此，在填充数据时，需要将交换流的计量单位进行统一。对于同一个流，本文使用流基准属性中基准单位进

行物理单位的统一。在填充矩阵数据时，一方面需要获取交换流中的数量值（定义为 *Amount*），还需要根据交换流中的单位获取单位与基准单位的转换因子（定义为 *UnitFactor*）以及流的流属性因子（定义为 *PropertyFactor*），通过  $Amount * UnitFactor * PropertyFactor$ ，将物质的交换流数据的单位统一转换为基准单位，进而实现物质单位上的统一。例如数据库中存储的交换流数据为  $2\text{dm}^3$  的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  的基准流属性为质量。在  $0^\circ\text{C}$ , 标准大气压下,  $\text{CO}_2$  的体积属性和质量属性之间的属性因子为 1.9643,  $\text{dm}^3$  与基准单位  $\text{m}^3$  的换算系数为 0.001, 矩阵中填充的  $\text{CO}_2$  的数值为  $2 * 0.001 * 1.9643 = 0.0039286$ , 单位为千克。

矩阵和需求向量构建完毕后，可以生成产品系统对应的线性方程组，通过解线性方程组获得产品系统中每个单元过程的比例因子  $s$ , 通过单元过程的比例向量和干预矩阵  $B$  线性相乘，获得产品系统的清单分析结果  $g$ ，进而计算出产品系统的影响类型参数结果和环境影响加权结果。

### 3.5 本章小结

本章的主要任务是建立 LCI-EM 数据库，通过参照 ISO4048 国际标准和现有的数据库管理软件，将机械产品 LCA 分析涉及的数据抽象为实体模型。基于产品系统和实体模型之间的关系可将实体分为通用数据集和应用数据集，借助 MySql, Navicat 等数据库开发工具，构建了交换流表、流表、过程连接表、流属性因子表等 20 张表，用于存储机电产品生命周期范围内的清单数据，并构建相应的 LCA 分析建模平台，实现对清单数据的操作、计算，为 LCI 语义建模提供数据来源。

## 4 产品全生命周期清单分析语义模型

### 4.1 产品 LCI 本体概念模型

产品 LCI 数据模型能够表示产品全生命周期过程的输入输出关系，在关系型数据库中得到很好地应用，但是也存在如下不足：（1）过程和流数据涉及各种术语概念以及它们之间的联系，缺乏数据概念的语义表示，LCI-EM 很难实现数据的交互和查询；（2）LCI 建模和分析依赖大量交叉学科知识，而 LCI-EM 缺乏知识支持；（3）LCI 建模结果是一组数据表数据，数据之间的相互关系需要人去解释，不利于后续的应用，例如从建模结果中发现知识和问题、追溯产品对环境和资源的影响等。本文在第三章 LCI 数据模型 LCI-EM 基础上从如下方面定义 LCI-SM 模型：

（1）基于本体技术研究机电产品全生命周期技术领域内各个阶段主要过程概念、产品实体模型中主要概念，构建概念本体；  
 （2）构建研究单元过程与输入输出流之间的关系，构建关系本体。

为了推进 LCI-SM 模型的规范性和可交换性，本文在借鉴相关研究成果的基础上，结合 LCI-EM 数据库模型的特性，采用 Protégé 本体建模工具构建 LCI-SM 模型。LCI-SM 模型定义了产品系统、过程、流、流属性、角色、地点、数量、单位 7 个核心概念及其之间相互关系，如图 4.1 所示。

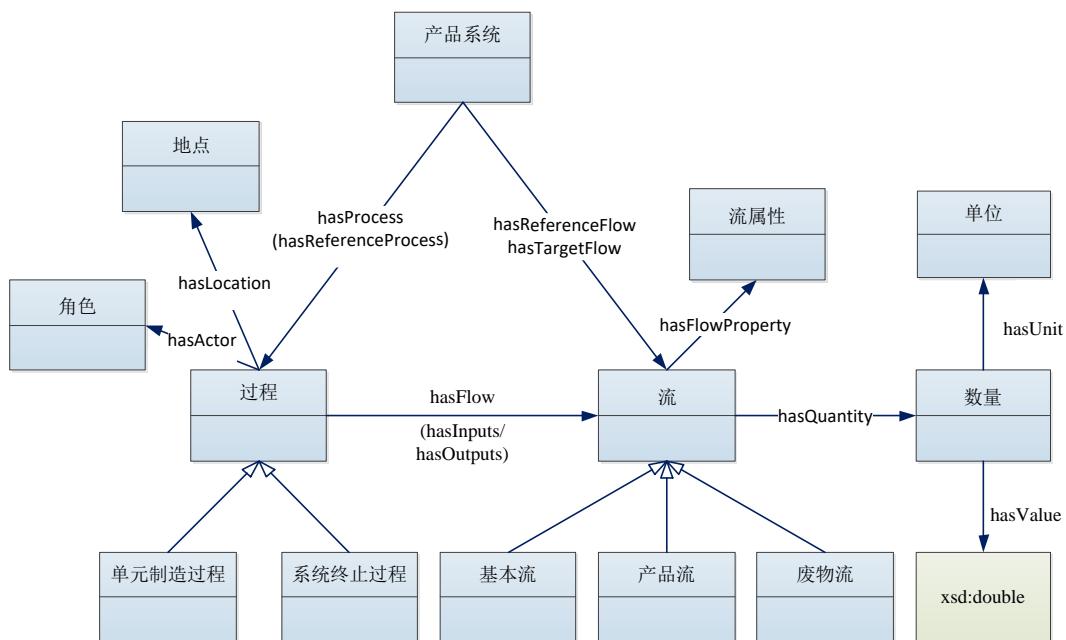


图 4.1 产品 LCI 数据本体模型  
 Fig. 4.1 Diagram of product LCI data ontology model

#### 4.1.1 流本体概念模型

流类是对 LCI 数据中流概念的抽象。流是单元过程的输入输出数据，根据输入输出数据特点，定义了流本体的分类模型，如图 4.2 所示。

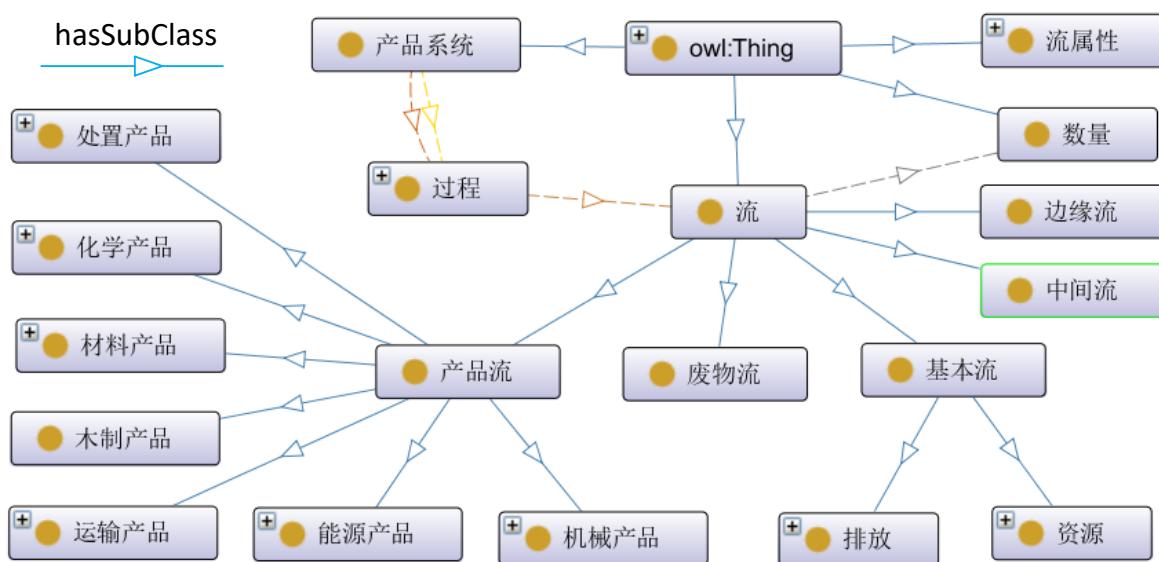


图 4.2 流本体分类模型  
Fig. 4.2 Diagram of classification model of flow ontology

根据流的类型，将流分为基本流、产品流和废物流，具体定义如下：

- 基本流

基本流是单元过程与环境之间直接交换的物质流，基本流是计算产品全生命周期环境影响量化数据的主要依据。根据其特点，基本流类再导出排放类、资源类和废弃物类三个子类；排放类还进一步分为排放到土壤类、排放到水中类和排放到空气中类三个子类。资源类还进一步分为土地资源、水资源、地下资源、空中资源、林业资源等。

- 产品流

产品流是生产过程输出的物质流，可以作为单元过程与单元过程之间的交换。一个生产过程的输出流可能作为另一个过程的输入流。根据机电产品制造特点，产品流类主要分为机械产品类、材料产品类、化学产品类、能源产品类、运输产品类和处置产品类等，在此基础上，还需要更多的细分。产品流涉及产品全生命周期各个过程，是联系各个单元过程的纽带。

- 废物流

废物流是处置过程输入的物质流，也可以作为单元过程与单元过程之间的交换。一

一个处置过程的输入流可能来源于另一个过程的输出流。在包含处置过程的产品系统中，废物流可以作为生产过程和处置过程的纽带。

根据流在产品系统中的连接关系，将流分为边缘流和中间流。

- 边缘流

边缘流是指通过系统边界的物质流和能量流。基本流都是边缘流，没有提供方的产品流也是边缘流。在进行生命周期清单分析时，统计的都是边缘流的清单结果。

- 中间流

中间流是指通过产品系统内部用于连接的物质流和能量流。是指介于所研究的产品系统的单元过程之间的产品、物质和能量。在产品系统中，存在连接关系的产品流和废物流是中间流。在进行生命周期清单分析时，不考虑中间流的清单数据。

流概念的属性如表 4.1 所示。

表 4.1 流概念属性  
Tab. 4.1 Table of the flow class property

属性名称	限制	说明
fromProcess	1 to 1	流和提供过程的连接。描述提供流的过程，是 hasOutputFlow 的逆属性。
toProcess	1 to 1	流和接收过程的连接。描述接收流的过程，是 hasInputFlow 的逆属性。
hasFlowProperty	1 to n	流和属性的连接，描述流的所有属性，包含技术属性、化学成分等。
hasImpactCategory	1 to n	流和影响类型的连接。描述流对特定影响类型的特征化因子。
hasCalculatedFormula	String	参数化计算时流的计算公式。
isLinked	Boolean	流实例是否作为中间流。

#### 4.1.2 过程本体概念模型

过程是 LCI 的基本分析单元，过程类是对产品全生命周期各个阶段过程概念的抽象。根据数据的来源，将过程分为两类，一类来自于数据库记录，作为连续系统生产过程，另一类是的机械制造单元过程。

##### (一) 连续系统生产过程

根据不同阶段过程数据特点，连续系统生产过程包含原材料过程、能源过程、运输

过程、使用过程和处置过程等，如图 4.3 所示。

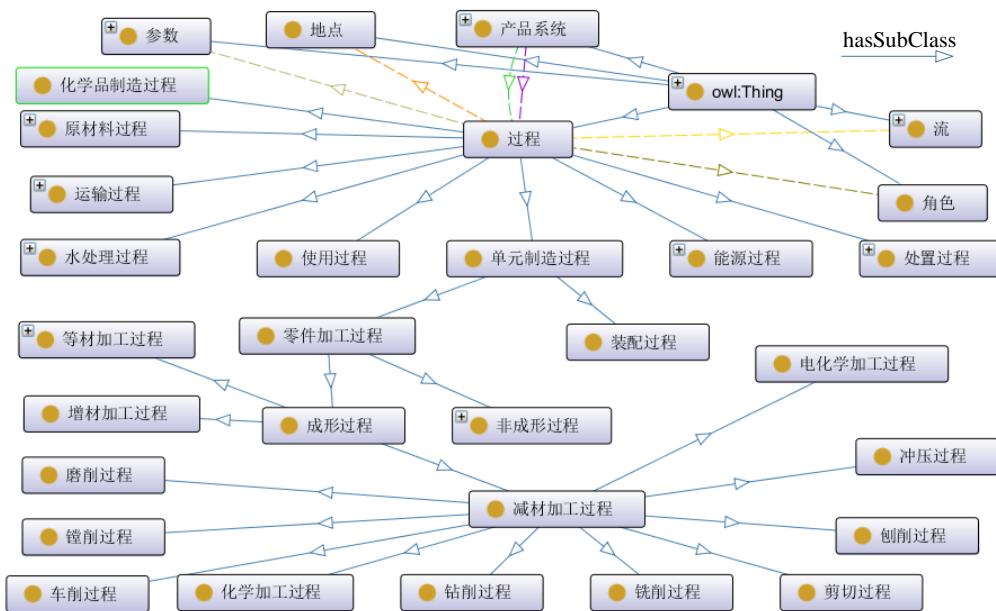


图 4.3 过程本体分类模型

Fig. 4.3 Diagram of classification model of process ontology

原材料过程指的是矿石开采及原料生产过程。按照所开采矿石的种类不同，矿石开采过程可分为金属矿石及石料矿石的开采过程。金属矿石的开采过程主要分为铁矿石和有色金属矿石的开采，而有色金属矿石的开采分为铝矿(铝土矿)、铜矿、铅矿、锌矿等矿石的开采<sup>[66]</sup>。石料矿石的开采过程包括采石场开采、冲积层采挖、岩石破碎和盐碱滩利用等过程。开采后的产品可用于多个领域，包括：建筑领域、机电产品领域、化工产品领域等。原料生产过程包括金属材料、非金属材料、合成材料的生产。金属材料的生产过程是采用各种冶金工艺技术从原矿石中和加工废料中提取出金属材料的过程。在纯金属中加入所需化学元素可制得合金，合金一般比纯金属的性能更为良好。非金属材料的生产包括树脂、塑料材料和非硫化热塑弹性体的制造，定制的树脂的混合，以及非定制化合树脂的制造。

能源过程包含能源的开采过程和生产过程。通常情况下能源指的是煤、石油等化石能源、生物质能及电能等。能源开采过程通常是对化石能源的提取过程，包括固、液或气态能源物质的开采过程。按照能源物质的不同，将能源的过程进行细分。煤涉及的过程主要分为烟煤、无烟煤和褐煤的开采。石油涉及的过程主要包含原油的开采和汽油制品的生产。天然气涉及的过程主要为煤成气及液化天然气等的生产。电能按照发电方式分为火力发电、水力发电、风力发电、核能发电、光伏发电等。生物质能相关的活动指

的是沼气等气体生物燃料的生产<sup>[67]</sup>。

辅助材料过程包含加工辅料和其他包装辅助材料的生产过程。常用的加工辅料包含润滑剂、冷却液等。包装辅料包含塑料包装和木质包装等。

运输过程指的是采用水、陆、空等多种运输方式，并设置终点站、存储方式、装卸方式等的货运过程。运输过程根据运输方式的不同可分为陆路、水上和航空运输。

## (二) 离散的单元制造过程

在机电产品制造中，坯料、零部件的加工、机械产品装配等离散的单元制造过程有其特殊性。在本课题提出的 LCI 本体模型中，将离散制造为主的机械制造过程单独定义一个“单元制造过程”类，在该类下派生零件加工过程和装配过程，零件加工过程又分为增材制造类、等材制造类和减材制造类。单元制造过程类下的单元过程通过激活一个参数模型和一个变换模型，实现单元过程的基本流清单数据的参数化直接计算。图 4.4 给出单元制造过程类与参数模型和变换模型之间的关系。

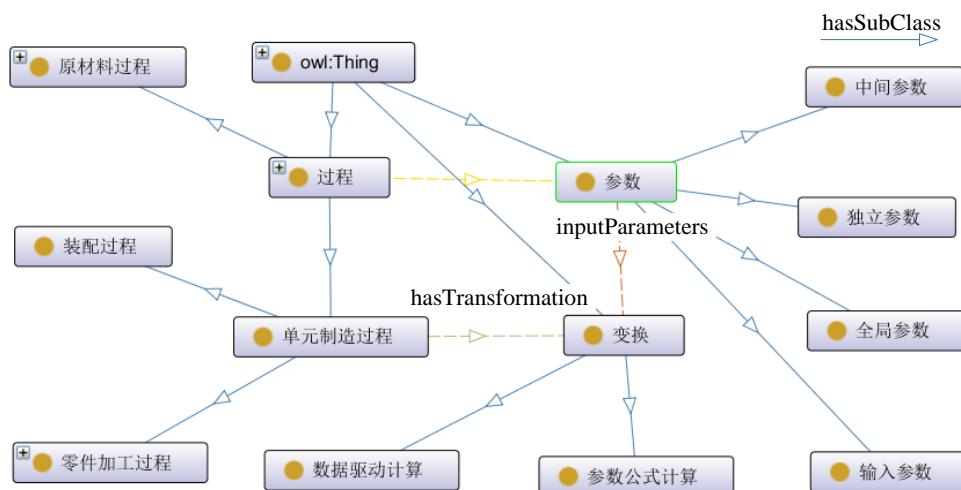


图 4.4 单元制造过程类与参数类及变换类之间关系

Fig. 4.4 Diagram of relation between the element manufacturing process class, parameter class and transformation class

## (三) 过程的属性

产品系统中，过程和流，过程和过程之间存在关联关系，即过程的属性。为便于分析，过程和流之间建立 hasInput/hasOutput 关联关系。根据过程和流之间的关系，后文使用规则推导过程和过程之间的 hasProvider/hasUpstream 关联关系。将过程组成产品系统时，产品系统包含单元过程的量化信息。因此建立过程实例时，包含产品系统下该单元过程的比例因子，传统的清单计算模型通过线性运算获得该比例因子。

过程类的属性定义如表 4.2 所示：

表 4.2 过程类属性  
Tab. 4.2 Table of class property

属性名称	限制	说明
hasInput	1 to n	过程和输入流之间的连接。描述过程的输入流，是 toProcess 的逆属性
hasOutput	1 to n	过程和输出流之间的连接。描述过程的输出流，是 fromProcess 的逆属性
hasReferenceFlow	1 to 1	过程和基准流之间的连接。描述过程的基准流
hasUpstream	1 to n	过程和上游过程之间的连接。描述过程链中位于过程上游的过程
hasProvider	1 to n	过程和提供过程之间的连接。描述过程链中直接位于过程上方的过程，是 hasUpstream 属性的子属性
hasTotalFlow	1 to n	过程和清单结果中所有流之间的连接。描述过程及其上游过程所有基本流和没有连接的产品流。
hasProcessParameter	1 to n	过程和参数之间的连接。描述过程的参数信息。
hasScaleValue	Double	在给定的产品系统中，过程的量化系数。

#### 4.1.3 其它本体概念模型

##### (一) 产品系统类

其中，产品系统类是对生命周期评价中产品系统概念的抽象。产品系统是单元过程的集合，通过产品系统将不同的单元过程进行关联。功能单位是产品系统进行量化的基准。作为 LCA 的基础，功能单位为输入和输出过程中的数据归一化提供基准。产品系统包含功能单位的对象属性，主要属性定义如下：

1. hasTargetFlow (1 to 1): 产品系统和目标流之间的连接。
2. hasReferenceProcess(1 to 1): 产品系统和基准过程之间的连接。即产品系统中直接实现一个功能单位的单元过程。
3. hasProcess(1 to n): 产品系统和涉及的单元过程之间的连接。
4. hasSystemProcess(1 to 1): 产品系统和系统过程之间的连接。
5. hasImpactMethod(1 to 1): 产品系统和影响评价方法之间的连接。

## (二) 流属性类

流属性类是对物质属性概念的抽象。根据流属性的类型，可以构建流属性(FlowProperty)的子类含量属性(ContentProperty)、物理属性(Physical-Property)和经济属性(EconomicProperty)。含量属性是指物质流中某种化学物质的含量，包含子类碳含量(Content\_carbon)、镉含量(Content\_cadmium)、铅含量(Content\_lead)等。物理属性用来说明流某一物理量的属性，如质量、能量、体积、距离等。经济属性通常用来说明流的价值属性。

## (三) 地点类

地点类主要表征过程发生的场所、地域范围，流所涉及的地域范围等。

## 4.2 产品 LCI 分析的语义表示

从本体建模的角度来看，产品清单分析语义表示就是构造“产品系统”概念模型的实例，通过上节介绍的本体概念模型生产产品系统及相关过程、流等概念的实例，组成产品系统 LCI 数据的实例库，实例之间的语义关系通过属性进行定义。这样，产品 LCI 清单数据可以表示为本体模型标记的有向图： $G = \langle V, E \rangle$ ，式中  $V$  表示图的节点集，由一组本体概念模型标记的过程、流、流属性及物质的实例组成； $E$  表示连接图节点实例的有向边集。OWL 通过本体标注 RDF 实例节点，提供了对 RDF 图节点实例的语义，赋予了模型更强的推理能力。本文采用 OWL 作为语义表示语言，以 RDF 图数据结构组织产品系统、过程、流等概念实例。

根据 LCI-EM 模型中的过程连接表，获取产品系统中包含的过程连接信息。通过获得的过程连接信息，可以将产品系统中的所有过程以过程链的方式表示。根据深度优先算法，可以自下而上地构建产品系统涉及的所有实例，具体步骤如下：

(1) 从产品系统的目产品开始，构建流的本体实例。流的数量信息由产品的 hasTargetFlow 属性和 hasTargetValue 属性决定。

(2) 根据过程链的连接关系，目标产品由产品的基准过程产出，构建基准过程的本体实例，过程的比例系数由目标产品数量和过程基准流数量的比值决定。将过程的文本型信息声明为过程的值属性断言。

(3) 构建过程输入输出的流实例。过程的输入输出声明为过程实例的对象属性断言，其中，过程的基准流已由下游过程建立，不需要重复声明。流的数量信息由连续生产系统过程线性决定或由离散制造单元过程模版决定。

(4) 对于程输入流的本体实例，重复 (2) - (3) 工作，一步步向前构建上游的单元过程实例和流实例。

产品系统实例构建的示意图如图 4.5 所示。

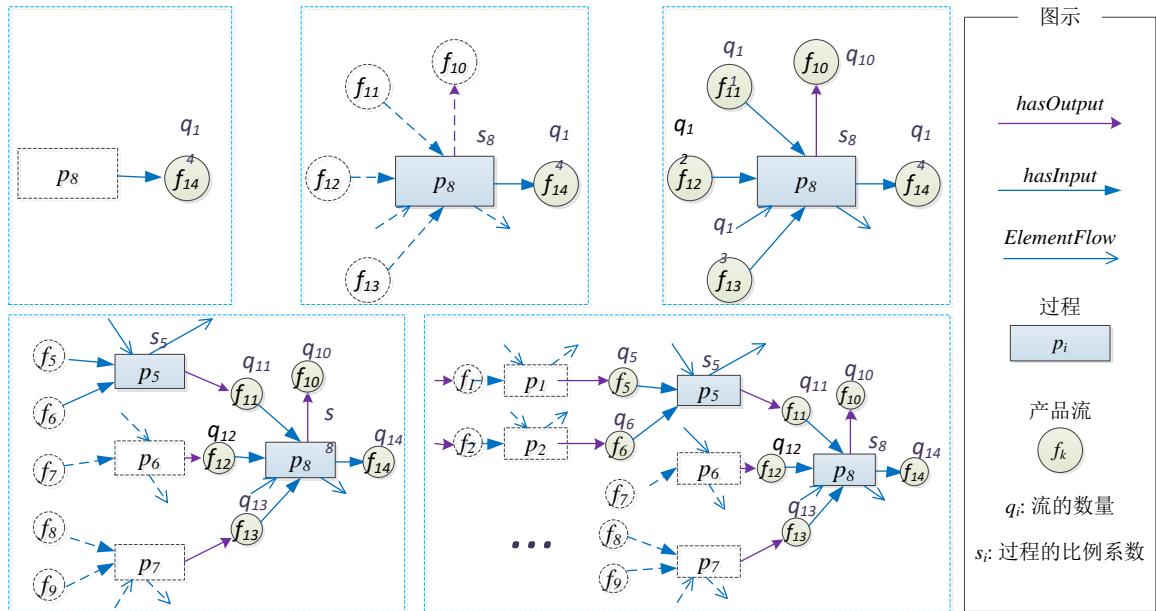


图 4.5 构建产品系统实例示意图

Fig. 4.5 Diagram of build individuals for product system

#### 4.2.1 构建产品系统实例

OWL 将 RDF 中的三元组描述为公理, 创建实例即为添加类断言公理。以“S0-2·5MW 风电机组”产品系统为例, 首先, 声明产品系统类和创建的实例。

Declaration(Class(:产品系统))

Declaration(NamedIndividual(:S0-2·5MW 风电机组))

然后, 声明实例“S0-2·5MW 风电机组”是“产品系统”类的断言公理, 即

ClassAssertion(:产品系统 :S0-2·5MW 风电机组)

这样, 就创建了产品系统的实例。然后, 添加实例的各个属性:

1. 产品系统的目标产品

ObjectPropertyAssertion(:hasTargetFlow :S0-2·5MW 风电机组:S0F\_T-2·5MW 风电机组)

2. 产品系统的基准过程:

ObjectPropertyAssertion(:hasReferenceProcess :S0-2·5MW 风电机组 :SOP-2·5MW 风电机组总装)

### 3. 产品系统的名称

DataPropertyAssertion(:hasName :S0-2·5MW 风电机组总装 "2.5MW 风电机组总装  
"^^xsd:string)

#### 4. 2. 2 构建过程实例

过程实例包含过程的名称、类型、过程参数等信息和过程的输入输出信息。过程实例和产品系统实例生成的方法类似，以“SOP-2·5MW 风电机组总装”装配过程为例，首先，声明过程类和创建的过程实例

Declaration(Class(:装配过程))

Declaration(NamedIndividual(:SOP-2·5MW 风电机组总装))

然后，声明实例“SOP-2·5MW 风电机组总装”是“过程”类的断言公理：

ClassAssertion(:过程 :SOP-2·5MW 风电机组总装)

过程实例包含输入/输出流的清单数据，流的实例构建见 4.2.3 节，过程实例和流实例之间的关系用对象属性 hasInput/hasOutput 关联，过程实例的输入输出关系如下所示：

ObjectPropertyAssertion(:hasInput :SOP-2·5MW 风电机组总装 :SOF0-轮毂总成)

ObjectPropertyAssertion(:hasInput :SOP-2·5MW 风电机组总装 :SOF1-机舱总成)

ObjectPropertyAssertion(:hasInput :SOP-2·5MW 风电机组总装 :SOF2-叶片)

ObjectPropertyAssertion(:hasInput :SOP-2·5MW 风电机组总装 :SOF3-塔架)

ObjectPropertyAssertion(:hasInput :SOP-2·5MW 风电机组总装 :SOF4-轴承座)

ObjectPropertyAssertion(:hasInput :SOP-2·5MW 风电机组总装 :SOF5-主机架)

ObjectPropertyAssertion(:hasReferenceFlow :SOP-2·5MW 风电机组总装 :SOF-2·5MW  
风电机组)

此外，过程实例还具有参数等信息，这些信息也构建为相应的属性断言：

ObjectPropertyAssertion(:hasProcessParameter :SOP-2·5MW 风电机组总装 :var0)

ObjectPropertyAssertion(:ofTemplateProcess :SOP-2·5MW 风电机组总装 :TP0)

DataPropertyAssertion(:hasID :SOP-2·5MW 风电机组总装 "52952"^^xsd:string)

DataPropertyAssertion(:hasName :SOP-2·5MW 风电机组总装 "2.5MW 风电机组总装  
"^^xsd:string)

DataPropertyAssertion(:hasScaleValue :SOP-2·5MW 风电机组总装 "1.0"^^xsd:double)

#### 4.2.3 构建流实例

流实例包含流的名称、类型、对应的物质和物质的属性信息。首先，声明流类和创建的流实例

Declaration(Class(:产品流))

Declaration(NamedIndividual(:SOF2-叶片))

然后，声明实例“SOF2-叶片”是“产品流”类的断言公理：

ClassAssertion(:产品流 :SOF2-叶片)

过程实例包含输入/输出流的清单数据，相应地，流实例包含提供过程和接收过程，流实例和过程实例之间的关系用对象属性 fromProcess/toProcess 关联。流实例与过程实例的关系如下所示

ObjectPropertyAssertion(:fromProcess :SOF2-叶片 :SOP2-叶片生产)

ObjectPropertyAssertion(:toProcess :SOF2-叶片 :SOP-2·5MW 风电机组总装)

fromProcess/toProcess 是函数式属性，每个流实例的提供过程和接受过程最多只有一个，如果只存在 fromProcess 或 toProcess，表示流实例属于边缘流，如果同时存在 fromProcess 和 toProcess，表示流实例属于中间流。

此外，流实例还具有名称、物质等信息，这些信息也构建为相应的属性断言：

DataPropertyAssertion(:hasName :SOF2-叶片 "叶片"^^xsd:string)

ObjectPropertyAssertion(:hasSubstance :SOF2-叶片 :物质\_50)

ObjectPropertyAssertion(:hasQuantity :SOF2-叶片 :zq532)

ObjectPropertyAssertion(:hasUnit :SOF2-叶片 :unit\_0)

DataPropertyAssertion(:hasQuantityValue :SOF2-叶片 "1.0"^^xsd:double)

DataPropertyAssertion(:isLinked :SOF2-叶片 "true"^^xsd:boolean)

#### 4.3 产品 LCI 语义知识映射规则

产品生命周期过程中，存在着大量的语义关系。上述语义本体模型提供概念层面的语义表示，但却难以表示数据之间的因果关系。启发式规则是用于表示因果关系的一种有效方式。SWRL 是从语义层面来描述启发式规则的一种语言，通过将 RDF 提供的知识转化为规则实现逻辑的推理，提供了更强的逻辑表达能力。因此，本课题采用 SWRL 定义 LCI 分析语义规则。SWRL 规则表示形式为： $Atom_1 \wedge Atom_2 \wedge \dots \wedge Atom_i \wedge \dots \wedge Atom_n \rightarrow Atom_p \wedge Atom_q$ 。其中  $Atom$  表示  $p(arg_1, arg_2, \dots, arg_n)$ ， $p$  代表类、属性或内置的表

达式,  $arg_1, arg_2, \dots, arg_n$  代表实例、字面量或者变量。

SWRL 支持开放世界假设<sup>[68]</sup>(Open World Assumption), 用户可以自定义各种概念。根据实例所关联的各种对象属性及数值属性, 抽象出更易理解和接受的概念, 这些概念一方面符合客观事实, 另一方面能够代替部分规则, 扩展本体的语义表示范围, 例如, 根据物质中有毒元素的含量, 可以将物质分为有毒物质、无毒物质; 根据对环境的影响, 可以将气体分为温室气体、酸性气体等。下面列出部分语义规则。

### (一) 显式定义概念的语义规则

4.1 中定义的流和过程本体虽然可以显式得到类层次的语义关系, 但缺乏显式语义定义。以部分流概念为例, 给出以 SWRL 语言定义的语义规则, 如表 4.3 所示。

表 4.3 流概念规则定义

Tab. 4.3 Rule definitions for flow concepts

序号	SWRL 规则	意义
1	流(?f) $\wedge$ 过程(?p) $\wedge$ hasInput(?p, ?f) $\wedge$ 环境(?e) $\wedge$ hasOutput(?e, ?f) $\rightarrow$ 资源(?f)	过程从环境中获取的输入是资源
2	流(?f) $\wedge$ 过程(?p) $\wedge$ hasOutput(?p, ?f) $\wedge$ 环境 (?e) $\wedge$ hasInput(?e, ?f) $\rightarrow$ 排放(?f)	过程向环境中释放的输出是排放
3	流(?f) $\wedge$ 过程(?p) $\wedge$ hasOutput (?p, ?f) $\wedge$ 过程 (?q) $\wedge$ hasInput(?q, ?f) $\rightarrow$ 中间流(?f)	如果流 $f$ 同时作为过程 $p$ 的输出, 并且作为过程 $q$ 的输入, 则 $f$ 属于中间流
4	流(?f) $\wedge$ 过程(?p) $\wedge$ 过程(?q) $\wedge$ fromProcess (?f, ?p) $\wedge$ toProcess(?f, ?q) $\rightarrow$ 中间流(?f)	如果流 $f$ 同时作为过程 $p$ 的输出, 并且作为过程 $q$ 的输入, 则 $f$ 属于中间流
5	产品流(?f) $\wedge$ isLinked(?f, true) $\rightarrow$ 中间流(?f)	存在连接的产品流是中间流
6	产品流(?f) $\wedge$ isLinked(?f, false) $\rightarrow$ 边缘流(?f)	没有连接的产品流是边缘流

### (二) 导出新的概念

由于应用的多样性, 一个 LCI 分析建模系统不可能定义所有的概念, 需要一个开放机制定义应用所需的概念, 新的概念定义如表 4.4 所示。

表 4.4 新概念规则定义  
Tab. 4.4 Rule definitions for new concepts

序号	SWRL 规则	意义
1	$\text{基本流}(\text{?}f) \wedge \text{排放到空气}(\text{?}f) \wedge \text{hasSubstance}(\text{?}f, \text{?}s) \wedge \text{二氧化碳}(\text{?}s) \rightarrow \text{温室气体}(\text{?}f)$	如果一个排放到空气的基本流的物质是二氧化碳，则该基本流是一种温室气体。
2	$\text{基本流}(\text{?}f) \wedge \text{排放到空气}(\text{?}f) \wedge \text{hasSubstance}(\text{?}f, \text{?}s) \wedge \text{甲烷}(\text{?}s) \rightarrow \text{温室气体}(\text{?}f)$	如果一个排放到空气的基本流的物质是甲烷，则该基本流是一种温室气体
3	$\text{基本流}(\text{?}f) \wedge \text{排放到空气}(\text{?}f) \wedge \text{hasSubstance}(\text{?}f, \text{?}s) \wedge \text{二氧化硫}(\text{?}s) \rightarrow \text{酸性气体}(\text{?}f)$	如果一个排放到空气的基本流的物质是二氧化硫，则该基本流是一种酸性气体
4	$\text{颗粒物}(\text{?}k) \wedge \text{hasProperty}(\text{?}k, \text{?}p) \wedge \text{直径}(\text{?}d) \wedge \text{hasValue}(\text{?}d, \text{?}v) \wedge \text{swrlb: lessThan}(\text{?}v, 0.0025) \rightarrow \text{PM2.5}(\text{?}k)$	如果颗粒物 $k$ 的直径小于 $0.0025\text{mm}(2.5\text{ }\mu\text{m})$ ，则颗粒物 $k$ 属于 PM2.5

### (三) 导出新的关系

通过知识规则定义，也可以已有属性关系中导出新的关系，为 LCI 数据查询和计算提供知识推理。表 4.5 给出一组新的属性关系定义。

表 4.5 新属性关系规则定义  
Tab. 4.5 Rule definitions for new properties

序号	SWRL 规则	意义
1	$\text{过程}(\text{?}p) \wedge \text{产品流}(\text{?}f) \wedge \text{hasOutput}(\text{?}p, \text{?}f) \wedge \text{过程}(\text{?}q) \wedge \text{hasInput}(\text{?}q, \text{?}f) \rightarrow \text{hasProvider}(\text{?}q, \text{?}p)$	如果过程 $p$ 的输出流是过程 $q$ 的输入流，则过程 $p$ 是过程 $q$ 的提供过程
2	$\text{过程}(\text{?}p) \wedge \text{产品流}(\text{?}f) \wedge \text{hasOutput}(\text{?}p, \text{?}f) \wedge \text{过程}(\text{?}q) \wedge \text{hasInput}(\text{?}q, \text{?}f) \rightarrow \text{hasReceiver}(\text{?}p, \text{?}q)$	如果过程 $p$ 的输出流是过程 $q$ 的输入流，则过程 $q$ 是过程 $p$ 的接收过程
3	$\text{过程}(\text{?}p) \wedge \text{过程}(\text{?}q) \wedge \text{hasProvider}(\text{?}p, \text{?}q) \rightarrow \text{hasUpstream}(\text{?}p, \text{?}q)$	如果过程 $q$ 是过程 $p$ 的提供过程，则过程 $q$ 是过程 $p$ 的上游过程

表 4.5 续  
Tab. 4.5 Cont

4	$\text{process}(\text{?}p) \wedge \text{process}(\text{?}q) \wedge \text{process}(\text{?}r)$ $\wedge \text{hasUpstream}(\text{?}p, \text{?}q) \wedge$ $\text{hasUpstream}(\text{?}q, \text{?}r) \rightarrow$ $\text{hasUpstream}(\text{?}p, \text{?}r)$	如果过程 $p$ 是存在上游过程 $q$ , 过程 $q$ 存在上游过程 $r$ , 则过程 $r$ 是过程 $p$ 的上游过程
5	$\text{process}(\text{?}p) \wedge \text{hasFlow}(\text{?}f) \wedge \text{边缘流}(\text{?}f)$ $\rightarrow \text{hasTotalFlow}(\text{?}p, \text{?}f)$	如果过程 $p$ 包含边缘流 $f$ , 则过程 $p$ 总的清单数据包含流 $f$
6	$\text{process}(\text{?}p) \wedge \text{process}(\text{?}q)$ $\wedge \text{hasUpstream}(\text{?}p, \text{?}q) \wedge \text{hasFlow}$ $(\text{?}q, \text{?}f) \wedge \text{边缘流}(\text{?}f) \rightarrow$ $\text{hasTotalFlow}(\text{?}p, \text{?}f)$	如果过程 $p$ 存在上游过程 $q$ , 并且过程 $q$ 包含边缘流 $f$ , 则过程 $p$ 总的清单数据包含流 $f$

## 4.4 清单分析语义查询

### 4.4.1 清单分析语义查询需求

与传统的 LCI 建模相比, 产品清单分析语义建模最显著的优点是可以对所需信息进行语义检索或查询。语义查询不仅取决于关键字匹配, 还取决于概念匹配和关系推理, 可以帮助获得所需的查询结果。

一方面, 在产品设计与评价协同建模中需要查询生命周期清单数据, 因此, 语义模型应满足生命周期清单的语义查询的需求, 产品的生命周期清单是整个产品系统中物质排放量和自然资源提取量的总和, 用  $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T$  表示产品的生命周期清单向量, 其中  $g_i$  表示物质  $i$  的量化值:

$$g_i = \sum_{j=1}^n \text{Process}(j) \cdot \text{ElementaryFlow}(g_i) \quad (4.1)$$

传统的矩阵法只能查询单元过程直接输入输出的清单数据, 在查询单个过程总的清单数据时, 需要将线性方程组的求解转换为矩阵的求解, 将需求向量转化为需求矩阵, 根据矩阵计算的结果获取单个过程的总的清单数据。

另一方面, 产品清单数据涉及各种资源、能源消耗和各种排放, 实时地产生海量的数据, 不同的企业、工厂的清单数据表示方式也不尽相同, 多源数据的转换、合并, 基于数据源相应格式的查询也是语义模型重要的需求之一。

#### 4.4.2 清单分析语义查询机制

机电产品的 LCI 数据通过形式化存储为一个选择实例 RDF 知识图，大量的过程和过程的流数据构成产品 LCI 知识的实例库。当通过数据库导入产品系统的实例后，可以对产品 LCI 数据的实例库进行语义查询推理。将构造的语义查询语句加载到 SWRL 引擎中，系统自动进行语义推理，从实例库中查询到满足上述查询语句流实例到一个列表中。语义查询不同于关键字匹配查询：

(1) 语义查询是一个集合查询，包括一个概念类下的所有实例，例如“流(?vflow)”是指所有的流实例，无论是基本流还是产品流；

(2) 查询概念可以是本体定义的原子概念，也可以是通过 SWRL 规则定义的导出概念。

SWRL 知识推理查询服务的实现机制如图 4.6 所示。

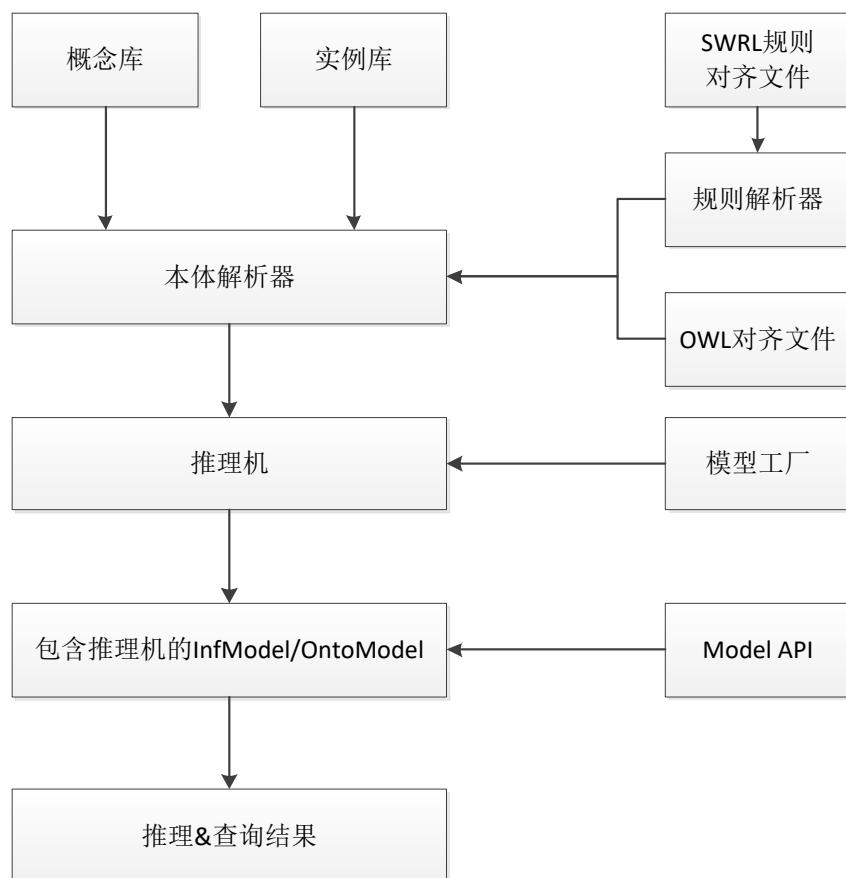


图 4.6 SWRL 知识推理查询框架  
Fig. 4.6 Diagram of SWRL knowledge reasoning query framework

根据清单数据的查询需求，构建 SWRL 语义查询语句。其查询语句类似 SWRL

规则语言，以 4.2.2 节建立的“SOP-2·5MW 风电机组总装”为例，语义查询的实例如下所示。

### 1. 查询单元过程直接产生的清单数据

```
hasFlow(SOP-2·5MW 风电机组总装, ?f) ∧ 边缘流(?f) ∧ hasSubstance (?f,?s) ∧ 物质(?s) ∧  
hasQuantity(?f, ?q) ∧ hasValue(?q, ?v) ∧ hasUnit(?q,?u) ∧ hasName(?s, ?fn) ∧ hasName(?u, ?  
un) ->sqwrl:select(?fn,?v, ?un)
```

单元过程直接产生的清单数据在数据库中和实例库中可以同样实现。

### 2. 查询过程及其上游过程总的清单结果

```
hasTotalFlow(SOP-2·5MW 风电机组总装, ?f) ∧ hasSubstance (?f , ?s) ∧ 物质(?s) ∧  
hasQuantity(?f, ?q) ∧ hasValue(?q, ?v) ∧ hasUnit(?q,?u) ∧ hasName(?s, ?fn) ∧ hasName(?u, ?  
un) ->sqwrl:select t(?fn,?v, ?un)
```

数据库或者实例库中并未显式地声明“SOP-2·5MW 风电机组总装”的 hasTotalFlow 对象属性，但是 SQWRL 查询引擎会解析 SWRL 规则并获取其导出的规则。根据 4.3 节的表 4.5 中定义的规则，SQWRL 引擎能够知道过程实例的清单数据及其上游过程的清单数据都属于过程 hasTotalFlow 属性的对象，因此，SQWRL 查询引擎可以查询出“SOP-2·5MW 风电机组总装”过程实例的清单数据及其上游过程的清单数据并进行展示。

### 3. 查询导出概念的清单结果

```
hasTotalFlow(SOP-2·5MW 风电机组总装, ?f) ∧ hasSubstance (?f , ?s) ∧ PM2·5 (?s) ∧  
hasQuantity(?f, ?q) ∧ hasValue(?q, ?v) ∧ hasUnit(?q,?u) ∧ hasName(?s, ?fn) ∧ hasName(?u, ?  
un) ->sqwrl:select t(?fn, ?v, ?un)
```

在建立物质的实例时，会建立物质各个属性的断言。根据 4.3 节的表 4.4 定义的规则，如果颗粒物  $k$  的直径小于  $0.0025\text{mm}(2.5 \mu\text{m})$ ，则颗粒物  $k$  属于 PM2.5。因此，上述查询，可以将直径小于  $0.0025\text{mm}(2.5 \mu\text{m})$  的颗粒物归属到 PM2.5 中，实现清单数据语义层面的查询。

## 4.5 本章小结

本章的主要任务是建立 LCI-SM 模型，首先，通过分析机电产品 LCI 数据涉及的概念，建立了机电产品 LCI 分析的本体概念模型，分析了本体概念之间的关系，其次，根据建立的本体概念模型提出了清单数据的语义表示、针对机电产品 LCI 数据中存在的大量语义关系，建立本体概念的知识映射规则，最后，分析机电产品 LCI 查询需求并选择适用的知识推理机，完成基于知识推理的机电产品 LCI 语义查询。

## 5 产品全生命周期清单数据库构建及语义建模

### 5.1 开发平台及软件工具

LCSI-DS 系统已在 pisx-lca (<http://internal.pisx.com:18081/login>) 上完成初步的部署。pisx-lca 项目由大连理工大学和上海湃睿信息科技有限公司共同开发。LCSI-DS 系统使用的开发平台及软件工具如表 5.1 所示：

表 5.1 开发平台及软件工具

Tab. 5.1 Development platform and software tools

开发平台/工具	具体描述
操作系统	Windows 11
服务器	Tomcat
研发平台	IntelliJ IDEA 2019.02
开发语言	Java (JDK 16), OWL, SWRL/SQWRL
数据库	MySQL
本体构建工具	Protégé 5.5
其他工具	Git, Maven, Navicat, Pellet

LCSI-DS 的登录页面如图 5.1 所示。



图 5.1 LCSI-DS 登录页面  
Fig. 5.1 Diagram of LCSI-DS login page

登录后的主页面包含清单数据库和清单语义知识两个模块，如图 5.2 所示。

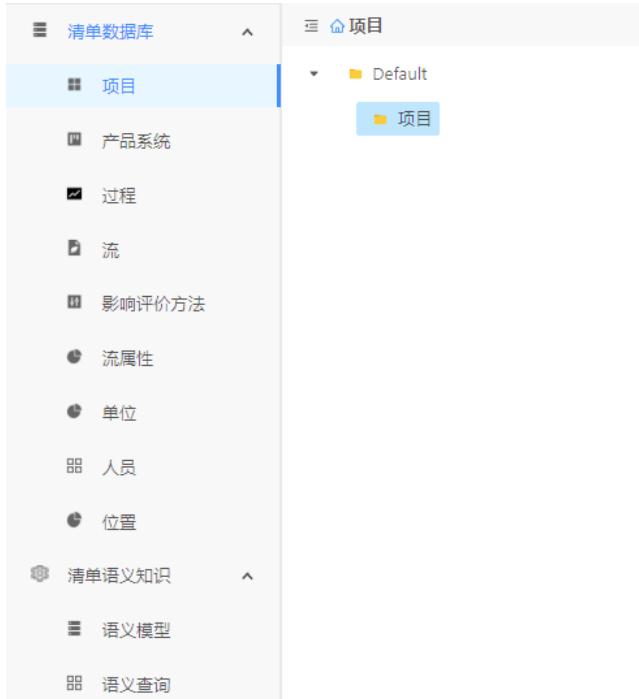


图 5.2 LCSI-DS 主界面  
Fig. 5.2 Main page of the LCSI-DS

清单数据库模块是对 LCI-EM 模型的实现，包含产品系统、过程、流、影响评价方法、单位等实体管理的子模块。在清单数据库模块中，可以实现对产品 LCI 数据的存储、管理、建模和清单计算。清单语义知识模块是对 LCI-SM 模型的实现，包含语义模型和语义查询两个子模块，可以根据清单数据库模块的数据，构建产品的清单数据实例，实现产品数据的语义关联，对产品的清单数据进行语义查询。

## 5.2 LCI-EM 数据库

清单数据库模块以 LCI-EM 模型为基础，支持导入 Ecoinvent 组织提供的 ecoSpold 2 格式的数据。目前已导入 14 组单位，包含 186 条单位数据，2000 余条基本流数据，1000 余条机械加工过程数据，17 种影响评价方法以及相关的影响类型数据。此外，清单数据库模块支持用户自主导入 ecoSpold 2 格式的过程数据集。

### (1) 单位数据

单位数据用于管理单位组和单位的相关信息，单位数据页面如图 5.3 所示。左侧的导航栏展示 LCSI-DS 系统中已经添加的单位组，选中单位组后，右侧可以展示该单位组下的所有单位及单位之间的转换因子，图 5.3 所示的是长度单位下的所有单位及其转换因子。此外，通过表格上方的工具栏，可以进行添加、修改、删除单位等操作。

The screenshot shows a software interface for managing units. On the left, there's a sidebar with a tree menu. Under 'Units', there are several sub-categories: Length Units, Length-Time Units, Illuminance, Currency Units, Freight Units, Passenger Units, Density Units, Area Units, Area-Time Units, Energy Units, Thermal Resistance Units, Time Units, Quantity Units, Volume Units, and Mass Units. The 'Length Units' section is expanded, showing a table titled 'length' with columns for unit name, conversion factor, and description. The table lists various units of length with their respective values and descriptions.

图 5.3 单位管理页面  
Fig. 5.3 Unit data manager

## (2) 流数据

流数据用于管理流的相关内容，涉及流基本信息、使用过程、流属性因子、特征化因子的管理。以 CO<sub>2</sub>为例，基本信息如图 5.4(a)所示，流属性信息如图 5.4(b)所示。

The screenshot shows two pages of the flow management system. 
 (a) Flow Basic Information: Shows a flow named '二氯化碳,化石' (CO<sub>2</sub>, fossil) with type '基本流'. It also lists CAS number '000124-38-9' and formula 'CO2'.
 (b) Flow Properties: Shows properties for CO<sub>2</sub>. The table includes columns for property name and conversion factor value. The data rows are:
 

属性名称	转换因子值
carbon content, fossil	0.272916486782489
carbon content, non-fossil	0
water in wet mass	0
water content	0
wet mass	1
dry mass	1
mass	1

图 5.4 流管理页面  
Fig. 5.4 Flow data manager

### (3) 过程数据

过程数据管理页面负责维护过程的相关的页面，包括单元过程的基本信息、输入输出的交换流、管理信息、建模信息和过程参数信息。通过构建单元单元过程。其中，图 5.5 表示“铬钢管生产”过程的基本信息，包含过程名称、描述、过程的开始、结束及有效时间等。图 5.6 表示过程输入、输出的交换流。

项目

产品系统

**过程**

流

影响评价...

流属性

单位

人员

位置

清词语义知识

过程

操作 铬钢管生产

基本信息 输入/输出 管理信息 模型信息 参数信息

基本属性

过程名称: 铬钢管生产

UUID: 154a43b3-7d46-4209-9b4b-f24de04a1940

描述: This is a proxy dataset for the production of chromium steel pipes.

数量基准: chromium steel pipe

过程类型: 单元过程

更新时间: 2022-01-04 00:22:10

版本:

有效日期

开始日期: 2008-01-01 00:00:00

结束日期: 2021-12-31 00:00:00

技术信息

技术信息:

地理信息

位置: Global

地理数据:

图 5.5 过程数据管理-基本信息页面  
Fig. 5.5 Process data manager-general information page

过程

操作 薄板轧制, 钢

基本信息 输入/输出 管理信息 模型信息 参数信息

输入流

操作	流	数值	单位	不确定度	默认提供方
水, cooling,通用 natural origin	0.013583434399118	m3	0		
basic oxygen furnace waste	-0.000193	kg	0		
chemical, inorganic	1.58e-8	kg	0		
electricity, medium voltage	0.22438168	kWh	0		
heat, district or industrial, natural gas	0.99636	MJ	0		

输出流

操作	流	数值	单位	不确定度
镉,离子	1.5e-7	kg	0	
铬,离子	5.4e-7	kg	0	
镍,离子	8.49e-7	kg	0	
BOD5, Biological Oxygen Demand	0.0000413	kg	0	
化学需氧量, Chemical Oxygen Demand	0.0000413	kg	0	

图 5.6 过程数据管理-交换流页面  
Fig. 5.6 Process data manager-exchanges page

#### (4) 产品系统数据

产品系统的数据管理页面负责维护产品系统的相关服务，包括产品系统的创建、修改、删除、基本信息的显示、过程的连接、清单结果的展示等。图 5.7 是产品系统的导航页面，用于展示已建立的产品系统。图 5.7 中显示的是中机生产力促进中心提供的 2.5MW 风电机组的数据构建风电机组的产品系统。表格的工具栏可以实现对产品系统的新建、修改、删除、计算等功能。新建产品系统时，需要选择产品系统的目标数量和单位。



5.7 产品系统数据管理-导航页面  
Fig. 5.7 Product system data manager-navigation page

产品系统中的过程连接页面支持对产品系统的层次结构进行图形化建模。风电机组过程链的连接页面如图 5.8 所示。

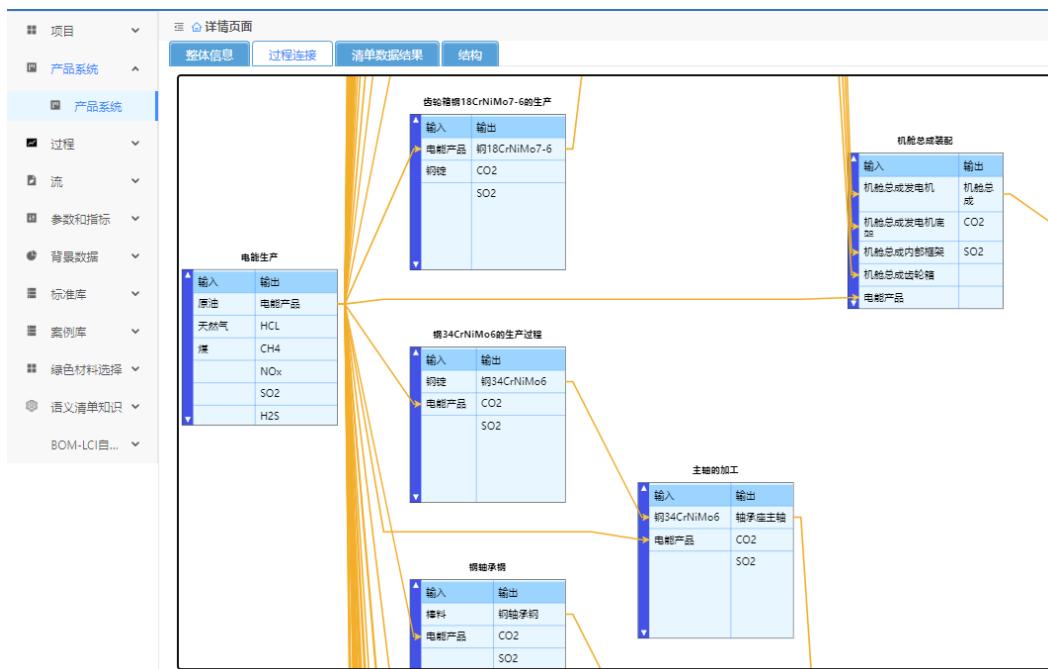


图 5.8 产品系统数据管理-过程连接页面  
Fig. 5.8 Product system data manager-process link page

在完成产品系统过程链的连接后，通过产品系统导航页面中工具栏的计算按钮，可以实现产品的 LCI 计算，2.5MW 风电机组计算的清单结果如图 5.9 所示。

流	数量	单位
原油	68.027354	kg
天然气	101.650068	kg
煤	11416.08456	kg
钢锭	319302.5	kg

流	数量	单位
HCl	5.02386	kg
CH4	105.168725	kg
NOx	51.215996	kg
SO2	2028.675446	kg

过程	产品	数量	单位
2.5MW风电机组总装	2.5MW风电机组	1	件
轮毂总成装配	轮毂总成	1	件
变桨系统总成装配	轮毂总成变桨系统总成	1	件
导流罩支架总成装配	轮毂总成导流罩支架总成	1	件

图 5.9 产品系统数据管理-清单结算结果页面  
Fig. 5.9 Product system data manager-LCI result page

### (5) LCIA 数据

LCIA 的数据管理页面负责维护环境影响的相关实体，包括影响评价方法、影响类型的创建、修改、删除，影响评价方法中归一化/权重集合的创建和归一化/权重因子的添加等。

以 ReCiPe 影响评价方法为例，包含的影响类型如图 5.10 所示。在“影响类型”选项卡下，可以实现影响评价方法中影响类型的添加、删除。

**基本信息** **影响类型** **加权集合** **参数**

**影响类型**

名称	说明	版本	当量单位
terrestrial ecotoxicity			kg 1,4-DCB-Eq
natural land transformation			m2
photochemical oxidant formation			kg NMVOC
human toxicity			kg 1,4-DCB-Eq
marine eutrophication			kg N-Eq
climate change			kg CO2-Eq
particulate matter formation			kg PM10-Eq
agricultural land occupation			m2a
freshwater eutrophication			kg P-Eq
metal depletion			kg Fe-Eq
terrestrial acidification			kg SO2-Eq
water depletion			m3
urban land occupation			m2a

图 5.10 影响评价管理-影响类型页面

Fig. 5.10 LCIA manager—the impact category page

以全球变暖影响类型为例，该影响类型的特征化因子如图 5.11 所示。在“特征化因子”页面中，可以关联影响类型和物质流，实现特征化因子的添加、修改、删除等功能。

**影响分类基本信息** **特征化因子**

**特征因素**

流	影响类型	单位	位置	因子
二氯化碳,化石	climate change	kg		1
二氯化碳,化石	climate change	kg		1
二氯化碳,化石	climate change	kg		1
二氯化碳,化石	climate change	kg		1
二氯化碳,化石	climate change	kg		1
二氯化碳, from soil or biomass stock	climate change	kg		1
二氯化碳, from soil or biomass stock	climate change	kg		1
二氯化碳, from soil or biomass stock	climate change	kg		1
二氯化碳, from soil or biomass stock	climate change	kg		1
二氯化碳, from soil or biomass stock	climate change	kg		1
二氯化碳, from soil or biomass stock	climate change	kg		1

图 5.11 影响评价管理-特征化因子页面

Fig. 5.15 LCIA manager— the characteristic factor page

### 5.3 LCI-SM 知识库

产品 LCI 知识库的所有搭建工作均在 protégé 5.5 编辑器(<http://protege.stanford.edu>)中进行，采用 OWL 语言描述以谓词逻辑的表达方式对每个过程的清单数据进行描述，形成实例库。通过将语义 Web 框架和 pellet 推理机集成，提高知识的逻辑推理能力。知识库以“.owl”文件的形式存储在共享的网络名称空间中。在上述 LCI 数据库构建和 LCI 分析本体模型基础上，目前基本完成了机电产品 LCI 分析语义建模。

#### 5.3.1 产品 LCI 知识库搭建

##### (1) 本体模型解析

文本采用 OWL-API4.5.19 实现对 protégé 5.5 中搭建的本体模型文件的解析。OWL-API 是一个以 OWL 为中心的库，支持现代 OWL-2 规范。OWL-API 直接将本体视为一组公理，基于公理实现本体数据层面的操作。通过 OWL-API 加载本体的方式如图 5.12 所示，



图 5.12 加载语义本体

Fig. 5.12 LCIA manager

本体加载后的 LCI-SM 结构如图 5.13 所示，其中图 5.13 (a)用于管理 LCI-SM 中的类，图 5.13(b)用于管理 LCI-SM 中的对象属性，图 5.13(c)用于管理 LCI-SM 中的规则。

(a)

(b)

(c)

规则名称	内容	解释
S1	$\text{process}(\ ?vprocess) \wedge \text{hasInput}(\ ?vprocess, ?vinput) \wedge \text{fromProcess}(\ ?vinput, ?vprovider) \rightarrow \text{hasProvider}(\ ?vprocess, ?vprovider)$	
S2	$\text{hasProvider}(\ ?vprocess, ?vprovider) \rightarrow \text{hasUpstream}(\ ?vprocess, ?vprovider)$	
S3	$\text{hasUpstream}(\ ?provider, ?upstream) \wedge \text{hasUpstream}(\ ?process, ?provider) \rightarrow \text{hasUpstream}(\ ?process, ?upstream)$	
S4	$\text{fromProcess}(\ ?vflow, ?vprovider) \wedge \text{toProcess}(\ ?vflow, ?vprocess) \rightarrow \text{hasProvider}(\ ?vprocess, ?vprovider)$	
S7	$\text{流}(\ ?flow) \wedge \text{isLinked}(\ ?flow, "false"^^xsd:boolean) \rightarrow \text{边缘流}(\ ?flow)$	
S8	$\text{基本流}(\ ?flow) \rightarrow \text{边缘流}(\ ?flow)$	

图 5.13 LCI-SM 主要结构

Fig. 5.13 Main structure of LCI-SM

## (2) 本体实例构建

可以采用多种方式构建本体实例。方式一：通过点击类层次结构中的特定类型，可以在右侧实例表中，添加指定类型的实例。根据产品生产的过程链，可以手动创建产品

系统、过程和流的实例，并且实现过程和流、过程和过程之间的属性的关联。具体操作方式如图 5.14 所示。

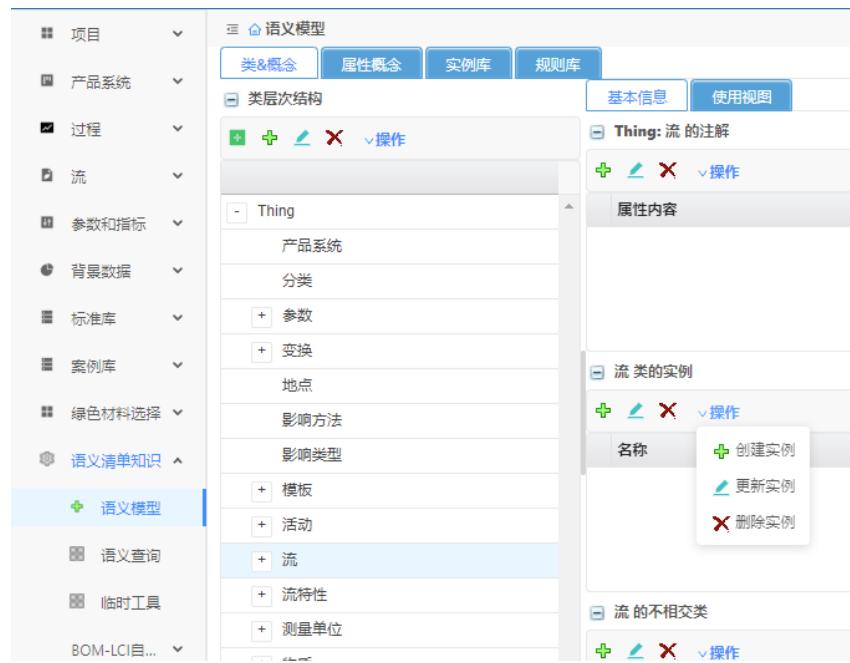


图 5.14 手动创建实例示意图

Fig. 5.14 Diagram of manually create individual

方式二，根据产品 LCI 数据库建立起来的产品系统，可以快速构建产品系统及其包含的过程、流的本体实例，如图 5.15 所示。根据 2.52.5MW 风电机组系统自动创建的实例如图 5.16 所示。



图 5.15 根据产品系统自动创建实例

Fig. 5.15 Diagram of automatic individual creation by product system

The screenshot shows a software interface for managing semantic models. On the left, there's a sidebar with navigation links: '清单数据库' (List Database), '清单语义知识' (List Semantic Knowledge), '语义模型' (Semantic Model) which is selected and highlighted in blue, and '语义查询' (Semantic Query). The main area is titled '语义模型' (Semantic Model) and contains several tabs: '操作' (Operation), '类&概念' (Class & Concept), '属性概念' (Property Concept), '实例库' (Instance Library), and '规则库' (Rule Library). The '实例库' tab is active. Below it, there's a search bar with '搜索关键字' (Search Keyword) and a '搜索' (Search) button. A table lists '实例' (Instances) with a total count of '共2333个对象' (2333 objects). The table has columns for '名称' (Name) and '操作' (Operations). The names listed include S0-2-5MW风电机组总装, S0F-2-5MW风电机组, S0P-2-5MW风电机组总装, S0F0-轮毂总成, S0F1-机舱总成, S0F2-叶片, S0F3-塔架, S0F4-轴承座, S0F5-主机架, S0P0-轮毂总成装配, S0P1-机舱总成装配, S0P2-叶片生产, S0P3-塔架装配, S0P4-轴承座装配过程, S0P5-主机架装配过程, and S0F00-轮毂总成变桨系统总成. To the right of the instance table, there are two sections: '实例的对象属性' (Object Properties of Instances) and '实例的数值属性' (Numerical Properties of Instances). Both sections contain tables with columns for '属性名称' (Property Name), '目标对象' (Target Object), and '属性值' (Value). The '实例的对象属性' table includes rows for hasReferenceFlow, ofTemplateProcess, hasInput, hasProcessParameter, and hasInput. The '实例的数值属性' table includes rows for hasName, hasScaleValue, and hasID.

图 5.16 2.5MW 风电机组的本体实例  
Fig. 5.16 Diagram of individuals for 2.5MW wind turbine

### 5.3.2 产品 LCI 语义查询

基于 OWL 和 SWRL 的知识推理过程需要由知识推理机完成。推理机可以方便地对本体中隐性知识进行显化。常用的推理机有：Pellet、Racer、Hermit、Fact++、Jena 和 Jess 等。产品 LCI 数据涉及大量描述逻辑，且对效率要求较高，综合考虑本次研究选用推理效率较高的 Pellet 推理机。此外采用 SWRL/SQWRL API 2.0.11 实现规则引擎的相关工作。SWRL/SQWRL 提供了 Java 环境的 API，在软件平台中通过引入 SWRL/SQWRL 的 jar 包，可以实现相关的推理、语义查询等功能。查询应用程序与 SQWRL 引擎之间的接口。目前主要实现了对产品 LCI 数据的语义查询。通过从数据库中导入产品系统的

记录，系统会生成一组实例集并保存在知识库中。语义查询根据指定的 SQWRL 语句检索出满足语义的结果。

根据产品 LCA 分析的计算模型，执行特定的查询语句，查询语句的实例如 4.4.2 节所述。将获得的查询结果后进行聚合，可以向用户展示语义清单结果。具体功能界面如图 5.17 所示。

The screenshot shows a user interface for a semantic database system. On the left, there is a sidebar with tabs: '清单数据库' (List Database), '清单语义知识' (List Semantic Knowledge), '语义模型' (Semantic Model), and '语义查询' (Semantic Query). The '语义查询' tab is currently selected. At the top right, there is a header with '语义查询' and two buttons: 'SQWRL 查询' (SQWRL Query) and '清单查询' (List Query). Below the header, there is a section titled '自定义SQWRL查询' (Custom SQWRL Query) containing a text input field with the following query:

```
hasUpstream(SOP0-轮毂总成装配, ?vprocess) ^ 过程(?vprocess, ?vflow) ^ hasInput(?vprocess, ?vflow) ^ hasSubstance(?vflow, ?vsubstance) ^ hasQuantity(?vflow, ?vq) ^ hasValue(?vq, ?vvalue) ^ hasUnit(?vq, ?vunit) ^ hasName(?vunit, ?vname) -> sqwrl:select(?vsubstance, ?vflow, ?vvalue, ?vname)
```

Below the query, there is a '结果排序字段' (Result Sort Field) dropdown set to 'vvalue', and three radio buttons for sorting: '默认' (Default), '升序' (Ascending), and '降序' (Descending). A large blue '搜索' (Search) button is located below the sort options. Underneath the search button, there is a section titled 'SQWRL查询结果' (SQWRL Query Results) with a table. The table has columns: '操作' (Operation), 'vsubstance' (vsubstance), 'vflow' (vflow), 'vvalue' (vvalue), and 'vname' (vname). The table contains the following data:

操作	vsubstance	vflow	vvalue	vname
<input type="checkbox"/>	:物质_9	:zf0002001_原油	"0.00137808"	"kg"
<input type="checkbox"/>	:物质_9	:zf0002301_原油	"0.00173304"	"kg"
<input type="checkbox"/>	:物质_10	:zf0002002_天然气	"0.0020592"	"kg"
<input type="checkbox"/>	:物质_10	:zf0002302_天然气	"0.0025896"	"kg"
<input type="checkbox"/>	:物质_9	:zf000241_原油	"0.00639624"	"kg"
<input type="checkbox"/>	:物质_9	:zf0002101_原油	"0.00795528"	"kg"
<input type="checkbox"/>	:物质_9	:zf0002201_原油	"0.00812232"	"kg"

图 5.17 SQWRL 查询页面  
Fig. 5.17 Diagram of SQWRL query page

## 5.4 应用实例

为了验证上述模型及清单计算方法的可行性，使用中机生产力促进中心提供的 2.5MW 风电机组的清单数据，对系统的有效性进行验证。

### 5.4.1 产品系统模型

根据导入的 2.5MW 风电机组的产品系统清单数据，构建风电机组的语义实例数据，生成的部分实例如图 5.18 所示。

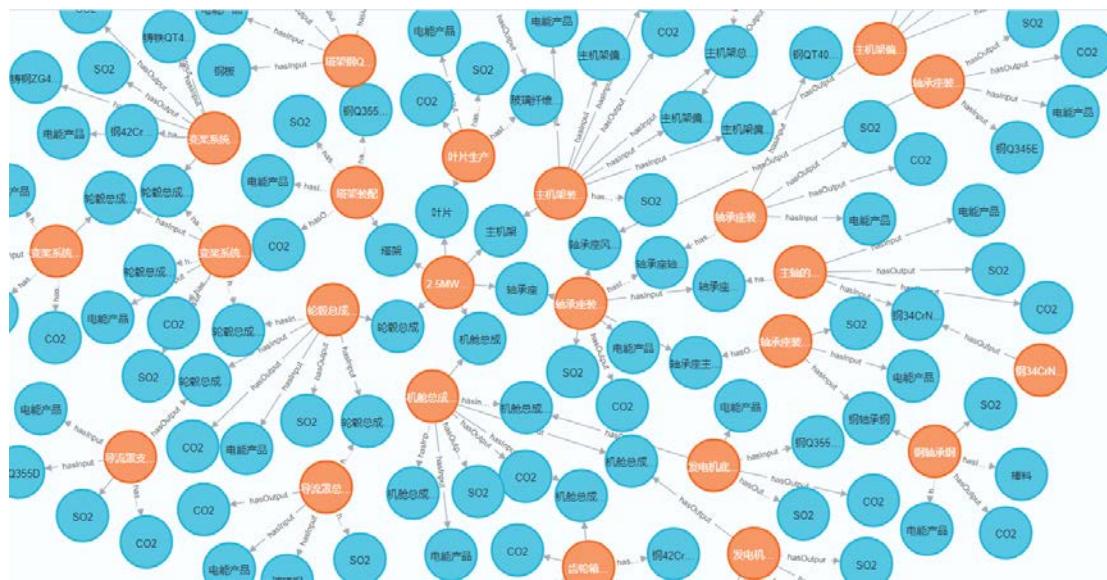


图 5.18 产品 LCI 数据实例 RDF 图(部分)

Fig. 5.18 Diagram of product LCI individuals RDF graph (part)

#### 5.4.2 清单结果查询

2.5MW 风电机组单元过程的清单数据查询如图 5.19 所示。

清单语义知识
SQWRL查询
清单查询

语义模型
语义查询

过程清单
过程上游清单
参数

需求清单

流	计算公式	总量	单位
电能产品	$k=-2775.848$	2775.848	kwh

输入清单数据

流	计算公式	总量	单位
煤	$k=2775.848$	1621.095232	kg
原油	$k=2775.848$	9.65995104	kg
天然气	$k=2775.848$	14.434409599999999	kg

输出清单数据

流	计算公式	总量	单位
NOx	$k=2775.848$	7.27272176	kg
SO2	$k=2775.848$	8.79943816	kg

图 5.19 2.5MW 风电机组单元过程语义查询结果

Fig. 5.19 2.5MW wind turbine unit process semantic query results

## 5.5 本章小结

在前几章研究内容的基础上，本章在 IDEA 开发平台上开发出了 LCSI-DS。首先简要介绍了 LCSI-DS 的开发平台及工具。然后介绍了 LCI-EM/LCI-SM 模型的实现。LCI-EM 的实现包含单位数据、流数据、过程数据、产品系统数据、环境影响管理，此外，还演示了产品系统清单计算的操作和结果。LCI-SM 主要实现对 owl 本体文件的解析，根据 LCI-EM 中构建的产品系统记录创建产品的本体实例，并根据实例完成清单数据的语义检索。最后用 2.5MW 风电机组的清单分析这个实例来验证 LCSI-DS 的科学性及有效性。

## 总结与展望

机电产品生命周期的清单数据涉及大量的概念和关系，同时，清单数据需要在不同的平台上进行交换。针对这一问题，本次研究中采用 OWL、SWRL、SQWRL 语言相结合的方式，在自建的 LCI 数据库的基础上，详细分析了机电产品 LCI 分析涉及的所有基本概念和概念之间的关系，将本体技术运用于机电产品 LCI 分析知识表达，建立了一个可开放、可共享、可拓展的产品 LCI 知识库。建立的 LCI 知识库既有很强的知识表达能力，又有很强的知识推理能力，从规则中积累的信息可以按需持久化到本体模型中，这对更快更好地完成机电产品清单分析，实现对产品的全生命周期评价具有重大意义。

### （1）实现机电产品 LCI 数据的存储

本文通过对生命周期评价模型的研究，针对机电产品特点，提出产品 LCI 数据模型和数据库设计，利用 spring JPA 技术，在 MySQL 数据库平台上实现了一个能够满足基本需求的 LCI 数据库。LCI 数据库用于存储机电产品生命周期范围内的清单数据，并构建相应的 LCA 分析建模平台，实现对清单数据的操作、计算，为 LCI 的语义建模提供数据支持。

### （2）实现机电产品 LCI 数据的语义表达

本文 LCI 知识库能够提供基于机电产品 LCI 数据的概念模型，从而在概念层面对机电产品领域内的产品系统、过程和流进行语义表示，将 LCI 数据建模实例为 RDF 图。本体概念模型有很强的知识表达能力，但是推理能力较差，为了增强知识系统的推理能力，本次研究自建多条 SWRL 知识规则。

### （3）实现机电产品 LCI 数据的语义检索

提出知识构建器的概念，相对于现在主流的通过编程语言去实现计算机可执行的逻辑推理，基于知识的可随时修改和扩展的知识编辑器提供了一种更灵活的知识表达的方式。将语义技术运用到 LCI 的领域范围，方便了数据的共享，同时具备了与推理机协作推理的能力。

本文研究已经基本达到研究目标，但仍然存在些许不足之处，具体如下：

（1）本文中的机电产品 LCI 数据库初步完成了 LCA 分析的要求，数据库中的数据记录需要手动录入或导入 ecoSplod 2 格式的数据，和企业实际生产的 BOM 数据还未关联，自动化水平不够高，需要深入企业调研产品工艺的 BOM 信息，建立更加便捷的产品 LCI 数据库系统。

（2）本文中的机电产品 LCI 知识库只是初步完成，对于一致性、关系冲突、冗余等问题，都需要进一步探索，建立更加智能的产品 LCI 知识库系统。

## 参考文献

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17):2273–2284.
- [2] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述—兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(07):1232–1242.
- [3] GB/T 24040–2008/ISO 14040:2006, 环境管理 生命周期评价 原则与框架[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. 资源科学, 2021, 43(3):446–455.
- [5] 杨希宁. 基于 BIM 的建筑改造项目生命周期环境影响评价研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [6] 李媛媛, 葛晓华, 王文静, 等. 技术生命周期评价进展及其在碳中和领域应用趋势分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, 1–15.
- [7] 李金潞. 寒冷地区城市住宅全生命周期碳排放测算及减碳策略研究[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2019.
- [8] SimaPro. End-to-end field service management software[EB/OL]. [2022-04-28], <https://www.simprogroup.com/>
- [9] Gabi, Software System for Economic. Ecological and Technical[EB/0A]. [2022-04-28], <https://gabi.sphera.com/china/software/gabi-software>.
- [10] 蒋莉蓉. 建生命周期评价数据库 促清洁生产 绿色制造[N]. 政府采购信息报, 2022, 03(006).
- [11] 万谊丹. 面向 LCA 清单的数据共享平台系统开发[D]. 安徽: 安徽工业大学, 2019.
- [12] GB/T 24044–2008/ISO 14044:2006, 环境管理 生命周期评价 要求与指南[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] GB/T 26119–2010, 绿色制造 机械产品生命周期评价 总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [14] GB/T 32813–2016, 绿色制造 机械产品生命周期评价 细则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [15] GB/T 30052–2013. 钢铁产品制造生命周期评价技术规范 (产品种类规则) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [16] GB/T 37552–2019. 电子电气产品的生命周期评价导则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [17] GB/T 40093–2021. 变压器产品生命周期评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [18] GB/T 40100–2021. 电机产品生命周期评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] 张帆. 基于生命周期评价的郑州某建筑主体结构环境影响分析[D]. 郑州: 中原工学院, 2015.
- [20] 王星荣. 制齿机床集成化绿色设计支持系统研究与开发[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [21] 王亮. 基于多种清单分析方法的压缩机转子生命周期评价[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2017.
- [22] 马雪, 王洪涛. 生命周期评价在国内的研究与应用进展分析[J]. 化学工程与装备, 2015(2): 164–166.
- [23] 刘夏璐, 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.
- [24] 王向前, 张宝隆, 李慧宗. 本体研究综述[J]. 情报杂志, 2016, 35(06):163–170.
- [25] Neches R , Fikes R , Finin T W , et al. Enabling Technology for Knowledge sharing[J]. AI Magazine, 1991. 3(12):36–56.
- [26] 曾维明. 基于领域本体的语义检索及个性化推荐算法研究[D]. 江苏:南京理工大学, 2010.
- [27] Gruber T R. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing[J]. International Journal Human-Computer Studies, 1993, 43:907–928
- [28] Borst W N. Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse. [J]. Universiteit Twente, 1997. 1(18):44–57.
- [29] Rudi S , Richard B, Dieter F. Knowledge Engineering:Principles and Methods [J]. Data and Knowledge Engineering, 1998. 1(25):161–197.
- [30] Bertin B , Scuturici V M , Risler E , et al. A semantic approach to life cycle assessment applied on energy environmental impact data management[J]. Proceedings of the 2012 Joint EDBT/ICDT Workshops, 2012:87–94
- [31] Villa F , Athanasiadis I N , Rizzoli A E. Modelling with knowledge: A review of emerging semantic approaches to environmental modelling[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24(5):577–587
- [32] Epimorphics Ltd, Earthster Core Ontology[EB/OL] Epimorphics Ltd: <http://www.epimorphics.com/web/projects/ECO>, 2010
- [33] Carral D , Scheider S , Janowicz K , et al. An Ontology Design Pattern for Carto-graphic Map Scaling[C]. Semantic Web: Semantics & Big Data International Conference. 2013
- [34] Tao J , Yu S. A Meta-model based Approach for LCA-oriented Product Data Management[J]. Procedia CIRP, 2018(69):423–428.
- [35] Overcash M , Griffing E , Vozzola E , et al. Advancements in Unit Process Life Cycle Inventories (UPLCI) Tools[J]. Procedia CIRP, 2018, 69:447–450.
- [36] Mittal V K , Bailin S C , Gonzalez M A , et al. Toward Automated Inventory Modeling in Life Cycle Assessment: The Utility of Semantic Data Modeling to Predict Real-World Chemical Production[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(2):1961–1976.
- [37] 李雪迎, 白璐, 杨庆榜, 等. 我国终点型生命周期影响评价模型及基准值初步研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(11):2778–2786.
- [38] 王玉涛, 王丰川, 洪静兰, 等. 中国生命周期评价理论与实践研究进展及对策分析[J]. 生态学报, 2016, 36(22):7179–7184.
- [39] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(2):234–237.
- [40] ISO 14048:2002, Environmental management —Life cycle assessment —Data documentation format[S]. Geneva:International Organizayion for Standardization, 2002.

- [41] 杨文君. 基于开放式协同合作的产品生命周期评价关键技术及系统研究[D]. 浙江:浙江大学, 2015.
- [42] 魏武华. 语义 Web 及其核心技术研究综述[J]. 信息与电脑, 2021, 33(11):6-9.
- [43] 胡珊. 语义网应用框架研究[D]. 南京:南京大学, 2014.
- [44] Soliman H. Deep learning based searching approach for RDF graphs[J]. PloSOne, 2020, 15(3).
- [45] 林龙成. 语义网中 OWL 本体概述及其构建方法研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(12):203-204.
- [46] Cosulschi M , Giurca A , Gabroveanu M . Querying, Modifying and Processing of RuleML Knowledge Bases[M]. International Journal of Artificial Intelligence, 2016. 2(14).
- [47] 周亮, 黄志球, 倪川. 基于 SWRL 规则的本体推理研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(10):67-70+75.
- [48] Corcho O. SPARQL2Flink: Evaluation of SPARQL Queries on Apache Flink[J]. Applied Sciences, 2021, 11(15).
- [49] 王飞, 张应中, 罗晓芳. 基于 SQWRL 的本体知识库语义查询[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(02):15-19+24.
- [50] 章勇, 吕俊白. 基于 Protégé 的本体建模研究综述[J]. 福建电脑, 2011, 27(01):43-45.
- [51] 王丹, 孙晓宇, 杨路斌, 等. 基于 SpringBoot 的软件统计分析系统设计与实现[J]. 软件工程, 2019, 22(03):40-42.
- [52] 张文字, 许明健, 薛昱. 论 spring 的零配置与 XML 配置[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(02):270-275.
- [53] 王萍. WEB 前端设计中 Angular JS 框架指令的运用[J]. 信息与电脑(理论版), 2018(19):106-107.
- [54] 敖曼. 基于 react 实现前端组件化开发的研究与实现[J]. 长江信息通信, 2021, 34(07):77-80.
- [55] 唐斌斌, 叶奕. Vue.js 在前端开发应用中的性能影响研究[J]. 电子制作, 2020(10):49-50+59.
- [56] 邓成, 孙书会. MVVM 设计模式的前端应用[J]. 电脑知识与技术, 2019, 15(29):249-250.
- [57] 刘伟, 李树文. MVC 模式下的软件开发框架设计[J]. 电脑知识与技术, 2021, 17(01):71-72.
- [58] 孙艳彬. 机电产品全生命周期评价基础数据库设计[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [59] 杨鸣. 机电产品模块化生命周期评价方法研究及其软件开发[D]. 上海:上海交通大, 2011.
- [60] 于随然, 陶璟. 产品全生命周期设计与评价[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [61] 袁泽, 李琦. 基于 LCA 的工业过程碳排放建模和环境评价[J]. 测绘科学, 2017, 42(05):196-200.
- [62] Huijbregts M , Steinmann Z , Elshout P , et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2017, 22(2):138-147.
- [63] 田亚峰. 运用生命周期评价方法实现清洁生产[D]. 重庆:重庆大学, 2003.
- [64] 邹晶晶. 沥青混合料生产环境负荷数据库及绿色发展评价体系研究[D]. 哈尔滨工业大

学, 2020.

[65] 时君丽, 王煜钧, 刘殿伟, 等. 基于 LCA 的产品生命周期数据库系统设计[J]. 价值工程, 2017, 36(07):72-74.

[66] 葛振华. 中国金属矿产开发物质流分析[D]. 北京:中国地质大学, 2007.

[67] GB/T 2987-2013. 能源分类与代码[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.

[68] 高桓. 基于开放世界假设的本体构建[D]. 南京:东南大学, 2019.

## 攻读硕士学位期间发表学术论文情况

1. **Jiawei Li** , Yingzhong Zhang, Jinhai Tian. Life cycle inventory database design for mechanical products. 2022 International Conference on Intelligent Computing and Computer Applications, 2022, 6, 24-26, Dalian.(本硕士学位论文第三章)

2. 大连理工大学(张应中, 李佳伟, 田景海). 机电产品全生命周期清单语义分析与评价软件系统. 中国计算机软件著作权

## 致 谢

光阴似箭，三年的研究生生活就要结束。在这三年的求学路上，最为感谢的是我的导师张应中教授。张老师高深的专业知识、严谨的教学态度、朴素的生活作风都让我受益匪浅。从研一的课程学习，研二的论文开题到如今论文完成的整个过程，张老师总能给予我及时的支持和帮助，对课题的不足之处一一指点，使我从对课题懵懂理解到完全掌握。张老师不仅在学术上对我影响颇深，还在思想上给我以极大启迪。张老师教导我们在学术道路上要有脚踏实地的精神，遇到困难时要有勇于拼搏的精神，喜获胜利时要有不骄不躁的精神，张老师教导的这一切我将铭记于心。

感谢我的师兄田景海、李瑞兴、陈义明、高玉龙，~~师姐斯雨在科研上对我的帮助~~，是你们为我的课题研究提出建设性意见；感谢我的同门安宁、王飞，是你们给我艰难的科研道路注入了持久动力；感谢我的师妹罗楠，师弟陈天宝、王金鸿，是你们给教研室带来了弥足珍贵的温馨；感谢我的室友范乐贤、陈玉亮、李睿琪，是你们默默陪伴着我、包容着我；感谢我的朋友李宁、杜佳琪、马若雁等，是你们在科研之余丰富了我的日常生活。祝你们学有所成，一帆风顺。

感谢父母的对我二十多年的付出与支持，是你们，每天按时接送初入校园的我，是你们，陪伴我走过一次次的困难，是你们给予我生命，是你们教会我为人处世的道理，是你们给予了我所拥有的一切。谢谢我的姐姐和姐夫，还有亲爱的表妹，是你们给我的生活增添了勃勃生机。

未来或许还是迷茫， 但我会无所畏惧， 迈步向前！

