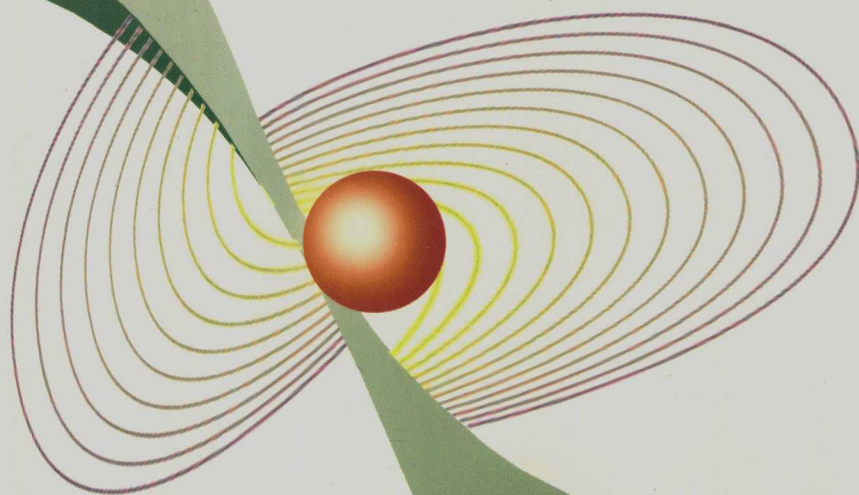


资源循环型生产过程的 物质流建模与仿真

ZIYUANXUNHUANXING
SHENGCHANGUOCHENGDE
WUZHILIU
JIANMOYUFANGZHEN

张 健/著



非
外
借

中国财经出版传媒集团
经济科学出版社
Economic Science Press

本书受北京世界城市循环经济体系（产业）协同创新中心项目、北京知识管理研究基地项目资助

资源循环型生产过程的 物流建模与仿真

张 健 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

资源循环型生产过程的物质流建模与仿真/张健著.

—北京: 经济科学出版社, 2016. 12

ISBN 978 - 7 - 5141 - 7685 - 8

I. ①资… II. ①张… III. ①生产过程 - 企业管理 - 研究 IV. ①F273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 317451 号

责任编辑: 王东岗

责任校对: 隗立娜

版式设计: 齐 杰

责任印制: 邱 天

资源循环型生产过程的物质流建模与仿真

张 健 著

经济科学出版社出版、发行 [新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

北京季蜂印刷有限公司印装

710 × 1000 16 开 10.25 印张 200000 字

2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 7685 - 8 定价: 39.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191510)

(版权所有 侵权必究 举报电话: 010 - 88191586)

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn))

前言

通过合理规划循环经济园区企业内部物质流，实现资源减量化投入、废弃物的减量化排出是发展循环经济的一个重要途径。资源减量化理念是在全球人口剧增、资源短缺、环境污染的严峻形势下提出的，为解决人类社会发展中出现的人与自然的尖锐矛盾找到了一条可行的途径。在企业生产过程中实现资源减量化投入，不仅可以解决资源紧张的问题，而且可以有效控制废弃物的排放，通过合理规划物质流系统过程实现减量化，已经成为当今循环经济研究的重点。

为提高经济效益和环境效益，对资源循环型生产过程进行合理的过程改造是必要的。但是在没有充分论证可行性之前的改造具有风险性，所以将实际生产过程进行模型化处理，并通过仿真软件进行仿真模拟是十分必要的，可以最大化的规避损失，提高优化效率。

从资源流动的组织层面来看，循环经济可以从企业、生产基地等经济实体内部的小循环，产业集中区域内企业之间、产业之间的中循环，包括生产、生活领域的整个社会的大循环三个层面来展开。本书主要以循环经济型企业

的物质流分析为基础，来构建循环经济微观建设体系。

本书面向资源循环型生产过程，通过物质流分析和 Petri 网仿真技术，实现对物质流系统的建模与仿真优化。基于资源循环型生产过程的特点和资源环境现状的需求，对生产过程的物质流进行了动态和静态相结合的物质流分析，静态物质流分析构建了物质流指标评价体系，动态物质流分析则是引入反馈理论，并结合 Simulink 进行了建模分析；同时本书引入了 Petri 网建模与仿真工具，根据实际需求，提出了物质流混杂 Petri 网模型和时间 Petri 网模型，为物质流系统资源减量化建模与仿真提供了技术支撑。

全书共分为八个章节。第 1 章为绪论部分，介绍本书的研究背景及研究意义；第 2 章为静态物质流分析与建模，以镁盐深加工系统为例进行了建模分析；第 3 章为动态物资流分析，引入反馈理论进行建模分析，并以硼酸生产过程为例论证了模型的可实施性；第 4 章为混杂 Petri 网建模章节，对物质流进行了形式化定义与仿真；第 5 章为物质流时间 Petri 网的建模与仿真优化理论，针对循环物质流减量化理论进行建模优化；第 6 和第 7 章是资源循环仿真系统的设计与应用；第 8 章为本书的结论章节。

本书主要由北京信息科技大学经济管理学院张健教授著写完成，同时也感谢项目组齐林、勾丽明、陈瀛、陈海涛、陈静静、邹雅迪等成员所做的大量工作。

在本书的写作过程中参考了国内外同行的文献著作，在此向这些作者们表示衷心的感谢。由于作者水平有限，书中难免会有不足、差错或谬误之处，恳请读者给予批评指正。

张 健

2016 年 10 月

目录

第1章 绪论 / 1

- 1.1 研究背景及意义 / 1
- 1.2 资源循环型生产过程物质流建模需求 / 3
- 1.3 国内外物质流分析研究现状 / 7
- 1.4 循环经济领域仿真研究现状 / 11
- 1.5 研究方法与技术路线 / 20

第2章 资源循环型生产过程的静态 SFA 建模 / 23

- 2.1 系统范围定义 / 23
- 2.2 静态 SFA 研究框架 / 26
- 2.3 物质流分析模型构建 / 27
- 2.4 物料平衡账户构建 / 29
- 2.5 评价指标体系设计 / 30
- 2.6 镁盐深加工生产系统的静态物质流分析 / 33

第3章 资源循环型生产过程的动态 SFA 反馈建模 / 51

- 3.1 动态 SFA 研究框架 / 51
- 3.2 动态 SFA 仿真模型构建 / 52
- 3.3 引入反馈的动态 SFA 模型构建 / 55

3.4 Simulink 建模 / 59

3.5 硼酸生产过程的动态物质流反馈模型研究 / 65

第4章 基于混杂 Petri 网的物质循环建模 / 72

4.1 物质流分析模型与 Petri 网模型的比较 / 72

4.2 物质流混杂 Petri 网模型的定义 / 73

4.3 生产单元的物质流混杂 Petri 网模型构建 / 75

4.4 镁盐深加工生产系统 MFA-HPN 模型构建 / 76

4.5 镁盐深加工生产系统 MF-HPN 模型仿真 / 81

4.6 本章小结 / 87

第5章 基于时间 Petri 网的物质循环流动态投入建模 / 88

5.1 物质流时间 Petri 网应用 / 88

5.2 物质流时间 Petri 网模型的定义 / 90

5.3 生产单元的物质流时间 Petri 网模型构建 / 91

5.4 氯化钾生产工序 MF-PN 模型的构建及仿真优化实例 / 96

5.5 案例小结 / 101

第6章 资源循环仿真系统的设计与建立 / 103

6.1 系统结构设计 / 103

6.2 系统功能设计 / 106

6.3 系统数据库设计 / 115

6.4 系统功能实现 / 117

第7章 资源循环仿真系统的实现与应用 / 122

7.1 系统模型的实现 / 122

7.2 系统模型的应用——以氯化钾生产为例 / 127

第8章 结论 / 140

参考文献 / 143

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景及意义

近年来,我国整体经济发展态势良好,但资源短缺和环境污染仍是经济可持续发展的瓶颈制约。资源不合理开采和利用导致资源短缺甚至枯竭,传统生产模式面临巨大挑战。资源循环型生产过程如何突破传统生产模式的制约,促进生产的健康发展,是当今世界经济可持续的重要研究内容。

传统的经济生产模式是“资源—产品—废弃物”单向物质流动模式。受这种模式的制约,传统生产过程在生产、消费过程中产生的大量废弃物被直接排放到环境中,经济系统通过不断地消耗资源、将资源变成废弃物以实现经济指数型增长,造成了多数自然资源的短缺与枯竭,对环境也造成了难以修复的污染后果。

从现状分析,国内传统的生产过程存在主要以下三个方面的不足。首先,在现阶段的市场经济条件下,我国传统的生产过程严重忽视资源消费方式的重要性,在重视生产能力和经济效益的同时,把重心转向了能迅速创造价值的产品当中。生产过程在不断扩大规模的同时,长期对资源进行大规模的不合理开采及利用,对资源和环境都造成了很大的负担。其次,我国部分生产过程的关键技术落后,使用的工艺水平较低,不可避免地造成资源消耗高、利用率低的情况,虽近年来不断引进新的加工工艺及技术,资源使用方面有所提高,但与发达国家相比,仍有较大差距。最后,环境问题一直是我

国社会经济所要面临的一个重大问题，生产过程的废弃物排放环节虽经过工艺处理，但由于生产过程复杂，废弃物处理可能存在不达标的情况，环境污染问题已经成为限制传统生产过程发展的一个潜在威胁。

总结来说，传统的经济生产模式浪费了大量自然资源的同时，对环境安全产生了严重的威胁，使人类面临着巨大的生存环境压力。在这种情况下，循环经济发展理念被提出，而且逐渐成为国内外研究的焦点。因此，传统的生产过程及生产方式亟须寻求改进的方向与方法，从而建立资源循环型生产过程，为企业的可持续发展模式提供支撑与推动。

将传统生产过程向资源循环型生产过程转变是企业实施循环经济战略的主攻方向，对整个工业循环经济发展的实现具有重要意义。企业是经济系统的最小单元，生产过程是企业的最小单元。要达到大幅提高资源效率，改善生态环境，建立节约型社会的目的，首先要鼓励传统生产过程进行循环式生产，只有对生产过程进行循环化改革，才能先在企业层面达到循环经济的实践效果，之后才能进一步实现循环经济在行业内、区域内乃至国家更大范围的推广。在国家节能减排、低碳环保的政策引导下，传统生产方式都在向节约资源、改善环境型的生产模式改革，以期达到经济与环境效益双赢。

在这种需求下，研究生产过程的物质循环，弄清各生产过程中物质的转换与迁移规律，优化生产过程的各个环节，提出提高物质利用效率和改善环境的措施，为传统生产过程的资源循环化改造的实践活动提供指导与借鉴，成为循环经济理论与实践研究的重点。另外，生产过程的物质循环过程中往往涉及因素众多而复杂，各种因素相互影响、相互制约。因此，生产过程改进要求管理者尽可能去深入了解每个过程单元工序的工作状态，这属于一项庞大的系统工程。想要对其进行全面深入的认识和了解，需要借助一定的计算机信息技术、仿真控制技术等手段，结合不同生产过程的独特特点，从而建立行之有效的物质循环分析模型并进行仿真研究。

物质流分析和管理是循环经济的核心调控手段，物质流分析方法作为研究经济活动中物质资源新陈代谢的一种模型分析方法，是循环经济的重要技术支撑。物质流分析方法能够更直接的体现出资源的内部消耗及走向，增进企业对生产过程的了解以及对原材料使用情况的掌握，从而为决策者在资源和环境方面决策提供参考，制定更符合实际过程的方案，来改进传统的生产

方式,提高生产过程的生产效率和经济效益。

对生产过程开展过程优化、提高减量化效率,前期的建模评估与仿真分析是重要前提。生产过程中的物质流系统是物质、能量、信息、价值高度协同和交错的复杂系统,在充分论证可行性之前的过程优化改造具有风险性。因此,将实际生产过程进行模型化处理,并通过仿真软件进行仿真模拟是十分必要的,可摸透过程中待解决问题的性质和影响条件,并检验所给方案的正确性,以最大化的规避损失,提高优化效率,通过优化提高仿真模型与现实生产拟合程度,为传统生产过程的资源循环化改造提出合理化建议。

1.2 资源循环型生产过程物质流建模需求

1.2.1 基于资源循环型生产过程生产特点的建模需求分析

对生产过程进行资源循环型改革,对推动企业循环经济发展有着十分重要的作用。存在资源循环型生产过程的企业一般涉及冶金、炼油、化工(塑料、药品、肥皂、肥料)、造纸和食品等行业,是实现资源循环利用的关键单元。因此,立足于资源循环型生产过程特点,开展与节约资源行动相关的生产过程的层面物质循环利用过程的研究,具有重要的理论和现实意义。

此类行业的传统生产过程除了具有高消耗、高复杂度等基本特点之外,具体还有以下几个特点:

①所需原料来自天然资源。能够进行资源循环化改革的生产过程所需的原料一般是粉末、液体或气体,主要来源是自然环境(如矿山、油田、盐湖、农场等),对资源的消耗是最直接的。

②产品一旦形成,无法还原。过程制造与离散制造不同的是,成品一旦生产出来,则无法还原,也就是说,不能再提取它,回到它的原始成分,而离散型生产,则可以将产品拆卸成元件,还原成原料。所以,对此类生产过程而言,产品没有报废后再利用之说。

③原料、产品等可称重。针对生产过程而言,无论是投入生产的原料,还是最后的产成品,其数量是用重量来衡量的。生产过程伴随的物质转化与迁移状况,都可以通过观察物质重量变化进行定量化分析,这就方便对生产过程进行物质流分析。

④伴随物质流与能源流。生产过程不但需要消耗资源,而且还形成了各种物质流,如产品、中间产品以及废气、废料等污染物的流动,另外,还伴随着能量流动,如热量、蒸汽等的流动与耗散。

⑤具有混杂特性。资源循环型生产过程一般是典型的连续型生产,但是一些生产单元中也存在混杂特性,除了有连续反应的生产过程外,也存在配料、上料、检修等离散操作,此外,还包含大量的离散控制设备(如各种阀门、泵、开关等)。物质和能量的转换与传递受生产过程的直接影响,也具有混杂性特点。

根据归纳的可实现资源循环化改革的生产过程的物质循环过程的特点,将其物质循环仿真需要考虑的主要因素集中到物质流和生产系统两方面,各主要因素可以进一步分解为相应的子因素,例如,物质流包括了原料、辅料、水资源、产品、废弃物等,生产系统包括了各种生产单元等。

在对生产过程的主要特点和物质循环仿真需要考虑因素分析的基础上,确定物质循环仿真问题要研究的对象主要是生产过程的物质流要素。据此,给出资源循环型生产过程的物质循环过程形式化建模的需求分析如下:

①本书要解决的问题是针对传统生产过程对环境产生的负面影响,帮助其找寻实现物质循环高效利用的途径。所以,选择的建模方法要求具有较强的形式化,不仅能够用清晰的图形表达方法使生产过程的物质循环过程可视化,用完备的数学方法对生产过程的物质循环过程进行量化分析,而且要易于实现高效仿真。

②对传统生产系统进行资源循环化改革涉及的因素较多,在整个大系统的框架下,还包括各种子系统和要素,所建立的模型要求能够准确表达出系统的各种组成要素,以及各要素之间的层次关系。

③生产过程的各个子单元之间存在着物质的转换与迁移活动,以此形成不同的物质流类别,而各物质流之间彼此联系、相互制约,要研究整个系统的物质循环情况,不仅需要所建模型能够准确量化生产系统物质流量,而且

需要能清晰表述出各物质流之间的逻辑关系。

目前,研究生产过程物质循环问题的模型方法主要有工业代谢分析模型、投入产出模型、物质流分析模型、生命周期评价模型等,它们运用于物质循环问题的量化分析都具有各自的特点,但是不能很好地满足本书要研究问题的形式化建模需求。

1.2.2 基于资源循环型生产过程环境现状的建模需求分析

自经济危机后,我国企业生产发展迅速,年产量逐年递增。但在发展的同时,不可避免带来严重的资源环境问题,由于生产过程的大量原辅料需求带来无限制的开采浪费,使自然生态系统遭到严重破坏。排除开采阶段,生产过程中也存在资源消耗高,环境污染大的特点,受资源高消耗与经济高速增长关系的影响,针对生产过程的资源循环化改革变得愈发重要,存在企业也亟须解决这些问题的思路和方法。

我国存在资源循环型生产过程的企业所需资源分布相对较广,开采难度高,它们不仅以气体、液体、固体形势存在,还以混合状态存在,比较典型的为盐湖矿产资源的固液共存状态。从生产过程的角度来说,我国资源开发存在的问题主要表现在以下方面:

①开发深度低。资源开采过程中的原液的提取不够完全,且提取过程中有损失发生,导致最后得到的资源量不够理想,也间接导致了某些行业资源短缺问题的出现。

②资源循环利用率低。虽然一些生产过程做到了资源循环化处理,但在生产过程中对原材料的使用仍存在不合理情况,造成原材料的浪费,并且在浪费的资源中有一部分是不可回收再利用的。总体上看,资源循环型生产过程资源循环利用率不高,形势严峻。

③产品产能低。产品产能是指某生产过程在某段时间内的产品产出,由于为稳定产出值,故一般可用均值来表示。我国资源循环型成产过程的生产技术相对发达国家较落后,由于技术的限制,在现有生产处理技术条件下,原材料的使用率并不高,损失量很大,因此产品产能相对较低。

④产品结构单一。目前,大部分资源循环型生产过程的生的产品种类

较少,市场没有明确的需求来推动新技术的引进和新产品的生产,尤其是一些重工业和化工业,不仅对环境污染大,对资源的消耗也比较严重。如化工业中企业对钾肥的生产,由于硫酸盐型盐湖卤水经处理后的产物是光卤石,但因其中其他矿物元素含量的种类和数量关系,导致其只能用来生产氯化钾,不能大量生产其他钾类产品,其他矿物就随废渣流入自然生态系统,不仅对环境造成污染,也对资源造成了一定浪费。

针对我国资源循环型生产过程面临的这些代表性问题,本书将仿真建模应用在资源循环型生产过程中物质的流动状态和加工过程两个部分,从成长过程的资源流动状态角度出发,研究资源循环型生产过程中资源消耗和循环利用情况,为资源循环型生产过程提供有效的改进思路 and 办法。

资源循环型生产过程涉及的行业较广,包括轻工业、重工业,其中比较典型的如钢铁、石油化工等,都是污染较高、资源浪费情况明显的行业。针对这些行业存在的资源环境高污染、高消耗的现状,结合资源循环型生产过程的一般特点,总结出以下几点资源环境方面的需求:

①本书要对一般资源循环型生产过程的情况进行分析,解决其资源利用效率低,环境污染严重的问题,找出具体问题环节所在,所以要选择的仿真方法必须能够详细地体现出资源循环型生产过程内部资源的利用情况,并且可以从中找出影响资源利用率的因素,对其改进,进而对企业改进生产提供指导和建议。

②资源循环型生产过程比较复杂,有的甚至包括几十种不同工序,但很多工序都比较有代表性,这要求仿真得出的模型要能很好地体现出各工序间关系,并能形象地表达出来。

③工序之间必然存在着物质流动和元素流动,而同一种过程中同一物质或元素可能会出现走向不同的情况,所以要对生产过程中特定物质的流动状态进行仿真,这要求仿真得出的模型要能很好地体现出不同工序间的物质流动状态,更细致地体现出物质在过程的内部走向,更好地对加工过程进行分析,从而找出加工过程中的问题所在。

目前,研究过程建模的方法很多,每种方法都有相应的特点,从而针对不同的情况,根据上述需求分析中提到的不同工序间的物质流动状态和各工序间的量化关系,对应建立不同性质的模型。采用特定物质流分析方法能够

很好的解决这个问题，深入分析每个工序的物质流动细节性问题。

1.3 国内外物质流分析研究现状

目前，研究物质循环问题的理论分析方法有许多，典型的主要为工业代谢分析法、物质流分析法、投入产出法和生命周期评价法等，这些方法已经在全球、国家、区域、产业或企业范围内的物质循环问题分析和研究方面取得了良好的成效^[1]。物质流分析作为衡量循环经济发展水平的量化工具，已经得到广泛应用。20世纪90年代，德国伍珀塔尔（Wuppertal）研究所的恩斯范恩·魏茨泽克（Ernst von Weizsäcker）提出了生态包袱的概念^[2]。物质流分析方法正是在生态包袱的基础上逐渐形成的，用于对经济、资源与环境三者之间的相互关系进行系统研究^[3]。物质流分析方法描述了物质经历人类从自然环境中攫取资源，从事生产和消费等经济活动，到废弃物产生以及回收再利用和资源化过程中的流量和流向^[4]。针对研究对象、研究范围不同，物质流分析的研究可以分为基于通量的物质流分析（MFA）和基于单一物质的物质流分析（SFA）；同时，也可以从国家层面、区域层面和企业层面三个方面着手进行研究。下面按照后者的视角对物质流分析的国内外研究进展进行梳理：

国家层面。最初，物质流分析方法主要应用于国家经济系统物质输入输出分析研究。奥地利、日本两个国家首先将物质流分析方法用于研究本国经济系统内自然资源和物质的流动状况，这是物质流分析方法在世界范围逐渐广泛应用起来的始端^[5]。随着经济发展带来的环境恶化情况越来越严重，各国研究机构与学者纷纷展开对本国家经济系统的物质流分析研究，其中，一些发达国家，如意大利、法国、芬兰、丹麦、奥地利、日本、瑞典、澳大利亚、英国等进行物质流分析的研究成果都颇为丰富^{[6]~[13]}，这些都是基于通量的物质流研究。另外，还有很多学者从宏观的视角，将物质流分析方法应用于研究某种物质在整个国家内的流动情况。勒本施泰因（Loebenstein）在1994年的时候对美国国家境内砷的流动情况进行了分析，这是最早的元素流分析（SFA）^[14]。汉森（Hansen）和拉森（Lassen），在2002年使用物

质流分析方法研究了丹麦等欧洲国家的磷(P)、铬(Cr)等元素在国内的代谢情况,并在此基础上提出金属制造和使用等有关方面的政策、建议以及立法依据等^[15]。穆克吉(Mukherjee),泽芬霍芬(Zevenhoven)等,2004年以物质流分析为基础对欧盟境内废弃汞从源头、处理以及风险等角度进行了充分的分析,为欧盟可持续废物管理提供了借鉴^[16]。多崎友广(Tomohiro Tasaki)等,2004年运用物质流分析方法就日本废弃电视机中溴化物阻燃剂及其他相关化合物的回收利用情况进行了分析^[17]。中村真一郎(Shinichiro Nakamura),2007年时结合物质流分析方法提出了废弃物投入产出模型,用以进行废弃物的生命周期管理^[18]。库里安·约瑟夫(Kurian Joseph)等,2009年根据皮革制品的制革工艺,利用物质流分析方法详细地分析了皮革在全生命周期过程中的资源消耗与环境影响情况,并依据得到的结论给出了相应改进意见^[19]。

在吸收国外物质流分析研究与运用经验的基础上,国内关于物质流分析方法的运用也不断完善。国内学者陈效述、李刚、刘敬智、徐明、张天柱、王亚菲、孔鹏志等通过运用物质流的理论和方法对不同时间段内我国经济系统的物质输入、输出、总量核算、发展变化趋势及宏观政策对国家经济系统物质流影响等内容进行了研究^{[5],[20]~[28]}。2007年,戴维斯(Davis)等对英国的钢铁使用状况进行了物质流分析,分析了钢铁的使用量以及废弃钢铁回收利用率,研究的重点是钢铁碎屑的产生与回收利用^[38]。郭学益等2008、2009年分别从铜、铅的生产,铜、铅制品的加工制造,铜、铅制品的使用和废铜、废铅的处理等阶段详细地阐述了铜、铅循环的物质流分析模型,然后运用模型进行实证分析并得出结论^{[29]~[30]}。2009年,台湾地区的陈伟强(Chen Wei qiang)等在人类圈铝元素生命周期特征的基础上,分析了2001年,2004年和2007年这三个年份中国大陆境内的铝物质流,并得出了铝的循环利用情况及损失^[31]。

区域层面。随着国家物质流分析研究成果的日趋成熟,区域物质流分析也逐渐开展起来。2004年,安妮卡·林克维斯(Annica Lindqvist)等运用物质流分析方法对瑞典三个市区的镉元素代谢进行了研究,研究结果表明物质流分析是制定区域环境管理相关决策的重要辅助工具^{[32],[144]}。2004年,徐一剑、张天柱通过物质流分析方法对贵阳市2000年的物质流整体情况、

1978~2002年的资源消耗情况,还有1996~2002年的污染物排放总量、结构、强度等情况分别进行了梳理与分析^[33]。2006年,张思锋、雷娟以陕西省为研究对象,将物质流分析方法用于该省1996年至2003年期间的物质输入变量与输出变量之间的函数关系推导及发展趋势预测^[34]。2007年,单永娟运用物质流分析方法对北京地区经济系统的物质流进行了分析,并从时间序列角度分析该地区物质流的变化趋势,给出了应对措施及建议等^[35]。2009年,姚星期从物质代谢理论视角,以物质流分析方法为工具,完成了对浙江省循环经济发展的规模、结构特点和运行效率等方面的认识和评估^[36]。2011年,李刚,王蓉等通过使用物质流分析方法估算江苏省经济系统的物质输入和输出情况,发现江苏省经济系统存在的问题,并评估了该省经济系统给生态环境带来的压力^[37]。

根据对已有国家和区域层面物质流分析研究成果的梳理,发现关于两者的物质流分析计算框架与方法相近。一般是引用“欧盟导则”确定的经典物质流分析框架,在此基础上结合实际研究目标做出修改,收集研究所需数据,用若干指标(如物质需求总量TMR等)进行分析评估,得到结果,进而为循环经济规划提供参考与指导。

企业层面。目前,企业层面的物质流分析的研究比较有限,且没有统一的计算标准,这主要是因为企业性质不同,研究的物质流对象就有所不同,从而使作为量化评估的指标也大同小异。

国外学者主要运用物质流分析方法对企业内低效率的物质流进行考察分析,然后通过结合其他评价方法或技术提出解决办法,对企业物质流利用情况研究的广度与深度都不断增强。2007年,克里斯蒂安·理查德·埃尔斯纳(Christiane Richard Elsner)等对一个化学制品企业构建了物质流与能源流耦合模型,通过该模型显示了企业内不同复杂程度物质流与能量流的流量,挖掘出整个企业过程中能源和物质的节约潜力并支持进行生命周期评估^[39]。2011年,罗德里格斯(Rodríguez)等提出了一种结合MEFA(物质流、能源流分析)模型与BAT(最佳可行技术)分析的适用于工业过程的方法。该方法首先通过MEFA模型确定可改善的物质或能源流,然后通过BAT分析来选择有针对性的技术解决方案,最后应用于砖瓦资源循环型企业进行模型验证^[40]。2012年,马尔塔·赫尔法(Marta Herva)通过将能源

和物质流分析 (EMFA)、生态足迹 (EF) 两种环境评价方法进行结合, 对一个夹克资源循环型企业 2002 ~ 2005 年期间生产造成的环境影响进行了评估^[41]。

国内学者对企业层面物质流利用情况研究的深度上与国外学者还有一定差距, 但是在广度上也有着丰硕的研究成果。戴铁军通过研究企业内部和企业之间的物质循环问题, 以生产过程的基准元素流图为基础, 探索物质流动规律及其对资源、环境效率的影响, 并通过钢铁生产流程的应用, 分析了各股铁流对流程铁资源效率、环境效率的影响^[1]。姜文英在 2007 年根据铅锌冶炼企业循环经济建设需要运用物质流分析方法对铅锌冶炼企业的铅元素流及锌元素流展开了深入研究^[42]。李娜等 2008 年利用物质流方法分析了啤酒企业各工艺段的物质代谢情况, 研究流失资源的物质流向, 针对啤酒企业的特点, 发现企业在资源利用方面的问题, 并提出解决对策^[43]。曹红葵、赵偶在 2008 年采用基于“欧盟导则”确定的物质流分析框架, 对所研究的水泥企业建立直接物质投入 (DMI)、总物质需求 (TMR) 等账户, 并利用账户衍生得到的环境载荷指标对水泥企业造成的环境压力进行比较分析^[44]。2009 年, 王军、刘西林等根据煤炭企业的特点构建了物质流分析的研究框架, 建立了相应的评价指标体系, 并进行实证研究, 针对得出的指标结果, 提出相应的对策及建议^[45]。2009 年, 刘雷利用元素流分析等方法, 研究了企业层面有机化工循环经济产业链网的物质流动代谢效率, 并以得到的各产业链物质流动代谢效率结果为依据, 研究了产业链网的设计方法^[46]。2010 年, 卢伟在分析我国废弃物循环利用系统的物质代谢特征的基础上, 扩展了物质流分析方法, 通过与投入产出分析方法、宏观经济计量模型、情景分析、生命周期分析方法等相结合构建了废弃物循环利用系统物质代谢分析模型^[47]。2011 年, 丁平刚、田良运用物质流分析方法对水泥企业的整个熟料及水泥生产过程中物质输入与输出进行了核算, 并结合水泥工业清洁生产标准的部分指标与计算结果进行了比较评定^[48]。智静、傅泽强等 2012 年根据能源 (煤) 化工基地物质代谢特点, 构建了能源 (煤) 化工基地物质流分析框架, 并进一步分析了宁东能源化工基地不同行业的物质代谢规模、物质代谢效率及污染排放结构^[49]。周继程等 2012 年从物质流和能量流的角度, 分析了炼铁系统的资源和能源消耗情况^[50]。邱诚等 2012 年运用物质流、能