

钢铁产品生命周期数据库研究与开发 *

王伟晗¹ 刘涛^{*,2} 刘颖昊²

(1. 上海应用技术学院城市建设与安全工程学院, 上海 201418;
2. 宝山钢铁股份有限公司研究院, 上海 201900)

摘要:高质量的本地化数据库是生命周期评价(LCA)研究的重要基础,企业数据库是其主要来源和基本构成单元。本文提出了中国钢铁企业 LCA 数据库研究与开发的主要方法,包括:(1)系统边界与数据范围划分方法,将产品废弃后循环再利用阶段纳入其中,反映该方法的导向性是促进废钢的回收再利用;(2)钢铁产品的生命周期清单计算方法,特别是针对钢铁企业复杂系统的分配原则,将钢铁生产单元划分为类似功能系统和多功能系统,分别应用物理化学属性和系统扩展法进行分配;(3)钢铁产品生命周期影响评价计算方法。

关键词:生命周期评价;企业数据库;钢铁;中国

中图分类号:X32 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2015.05.021

Research and Development of Life Cycle Database of Steel Industry Products *

WANG Weihang¹ LIU Tao^{*,2} LIU Yinghao²

(1. College of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418;
2. Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900)

Abstract:The high-quality localized database is the important foundation of Life Cycle Assessment (LCA) study, and enterprise database is the main source and the basic constituent units. The methodology for Chinese steel enterprises is put forward, which comprises three major aspects: (1) method of system boundaries definition, which is cradle-to-gate including end-of-life recycling, for promoting recycling and reuse of scrape; (2) method of life cycle inventory calculation for steel products, especially including the allocation principle for complex systems in steel manufacturing, which classify the process of steel production as similar functional system and multi-function system and apply the physical/chemical properties and system boundary expansion method for allocation respectively; (3) the method of life cycle impact assessment for steel products.

Key words:life cycle assessment; enterprise database; steel; China

1 引言

随着全世界对环保问题认识的提高,企业环境竞争力成为评价企业竞争力的主要因素^[1]。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种面向产品的“从摇篮到坟墓”的环境管理分析方法,得到越来越多的重视及应用。高质量的本地化数据库是生命周期评价研究的重要基础,而企业数据库是其主要来源和基本构成单元。

LCA 数据库的开发近年来得到了快速发展。在国外,Jungbluth 等^[2]更新了光电数据库,其已成为欧洲光伏工业协会和瑞士联邦的权威能源数据库。Mutel 等^[3]提出了一个可以将局地环境影响特

征化因子与生命周期数据库相结合的方法,从而提升生命周期数据库的地理代表性,这种方法在欧洲电力生命周期数据库中得到了应用。Nansai 等^[4]针对日本产品的能源消耗和污染物排放构建了符合全球系统边界的投入产出数据库。Sundaravaradan 等^[5]对 LCA 环境影响因子数据库进行了探索。Tardivel 等^[6]建立了土木工程的生命周期环境影响数据库-DIOGEN 数据库,并提出了数据可靠性的评估方法。Haddad 等^[7]针对在巴西广泛使用的建材、陶瓷,建立了生命周期清单数据库,并对不同的 LCA 方法进行了比较。Teixeira 等^[8]对不同区域和不同种类的鲜活农产品环境影响评价数据库进行了二次开发。Takano 等^[9]以 3 种不同建筑物为例,对比分析了不同的 LCA 影响评价数据库。在国内,张群^[10]以典型建材(水泥、玻璃、陶瓷等)为例,为我国建材行业中的典型企业建立了生命周期清单数据库。王洪涛等^[11]以电力、煤炭、燃油、运输等基础性

2014-12-03 收稿,2015-04-14 接受

* 国家自然科学基金(51276035),上海高校青年教师培养资助计划(405ZK),上海市科委财政“绿色能源与动力工程”项目(4521ZK)资助

** 通讯作者,E-mail: liutao237@baosteel.com; Tel:15026731254

产品为核心,得到了中国生命周期参考数据库 (CLCD)。刘芳^[12]论述了地理信息系统 (GIS) 技术与产品生命周期评价 (LCA) 数据库相结合的必要性、可能性和数据交换方式。于亚男等^[13]以特种设备风险因素为切入点,展开了全生命周期的风险因素数据库开发。王卫等^[14]提出了基于生命周期的数据库产品动态定价模式,丰富了现有电子资源定价模式。孙艳彬^[15]以机电产品为例,建立了机电产品全生命周期评价基础数据库。

针对钢铁产品的 LCA 数据库,国际钢铁协会、欧钢联以及国际上很多先进钢铁企业如 Nippon Steel、ArcelorMittal、TATA Steel 等都开展了行业数据库、区域数据库及企业数据库的研究与开发^[16-20]。不过,国内目前仅宝钢针对钢铁产品建立了企业 LCA 数据库。因此,本文将以宝钢钢铁产品为例,介绍面向中国钢铁行业的 LCA 数据库研究与开发的基本方法。

2 钢铁产品 LCA 数据库开发的主要方法

2.1 确定系统边界与数据范围

钢铁产品 LCA 数据库涉及的生命周期系统边界主要分三个阶段:原辅料与能源开采、生产和运输阶段;钢铁产品生产阶段;产品废弃后循环再利用阶段,不含下游使用过程。加入循环利用阶段的目的是反映本研究的导向性,要促进废钢的回收再利用、渣尘泥等钢铁副产品的循环再利用。生命周期系统边界如图 1 所示。

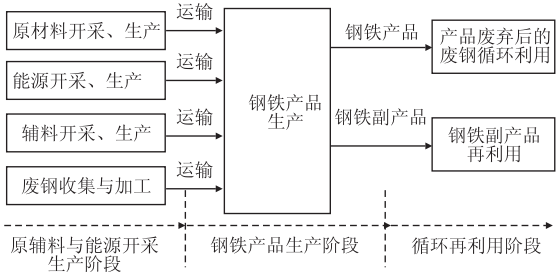


图 1 钢铁产品生命周期系统边界图

单元过程数据种类很多,应对数据进行适当的取舍,取舍原则如下:

- 1) 能源的所有输入均列出;
- 2) 原料的所有输入均列出;
- 3) 辅助材料质量小于原料总消耗 0.1% 的项目输入可忽略;
- 4) 大气、水体的各种排放均列出;
- 5) 小于固体废弃物排放总量 1% 的一般性固体

废弃物可忽略;

6) 道路与厂房的基础设施、各工序的设备、厂区内人员及生活设施的消耗和排放,均忽略;

7) 取舍准则不适用于有毒有害物质,任何有毒有害的材料和物质均应包含于清单中。

2.2 生命周期清单计算程序

2.2.1 数据与单元过程的关联

如果一个单元过程有多种产品,那么就需要对这个单元过程确定适宜的基准流,并计算单元过程的定量输入和输出数据。钢铁生产中很多单元过程都有多种产品,单元过程数据分配问题不可避免。

2.2.2 数据与功能单位的关联

数据与功能单位的关联也就是对收集的数据进行标准化,即将收集的实物流的输入输出处理为单位产品(功能单位)的输入输出。其计算方法是将各个工序或单元过程的输入输出数据除以产品的产量,即得到单位产品(功能单位)的原辅材料消耗、能源消耗和环境排放。

2.2.3 数据合并与分离

数据的合并与分离是根据单元过程数据的特点,视具体情况,对数据进行进一步处理。同一工序的不同生产设备,若其生产技术水平相当,输入输出种类基本相同,则可进行数据合并,如炼铁工序的 4 座高炉等;焦化工序由炼焦和化工组成,化工系统产品繁多,而且这些产品大部分是外卖到宝钢外部,不进入本生命周期评价系统,因此对收集的焦化工序的数据进行数据分离,只保留炼焦系统数据。

2.2.4 生命周期清单计算

生命周期清单计算是基本流在所定义的生命周期过程中的累积,基本流是以功能单位为基准的环境负荷。生命周期清单因子 g (如 CO_2 的排放) 的累积基本流按式(1)进行计算^[21]。

$$b_{T,F,g} = b_{F,g} + \sum a_{T,i} b_{i,g} \tag{1}$$

式中, $b_{T,F,g}$ 为以功能单位 F 为基准的基本流 g 的累积量; $b_{F,g}$ 为以功能单位 F 为基准的基本流 g 在产品生产过程中的直接流量; $a_{T,i}$ 为原辅料、能源等在产品系统中单元过程 i 每功能单位的直接消耗量; $b_{i,g}$ 为基本流 g 在单元过程 i 的直接流量; $\sum a_{T,i} b_{i,g}$ 为以功能单位为基准的基本流 g 在上游过程和下游过程的累积量,主要视研究边界所包含的单元过程而定。

由于钢铁材料 LCA 涉及的单元过程多达数千个,本文采用宝钢基于式(1)计算逻辑自主开发的

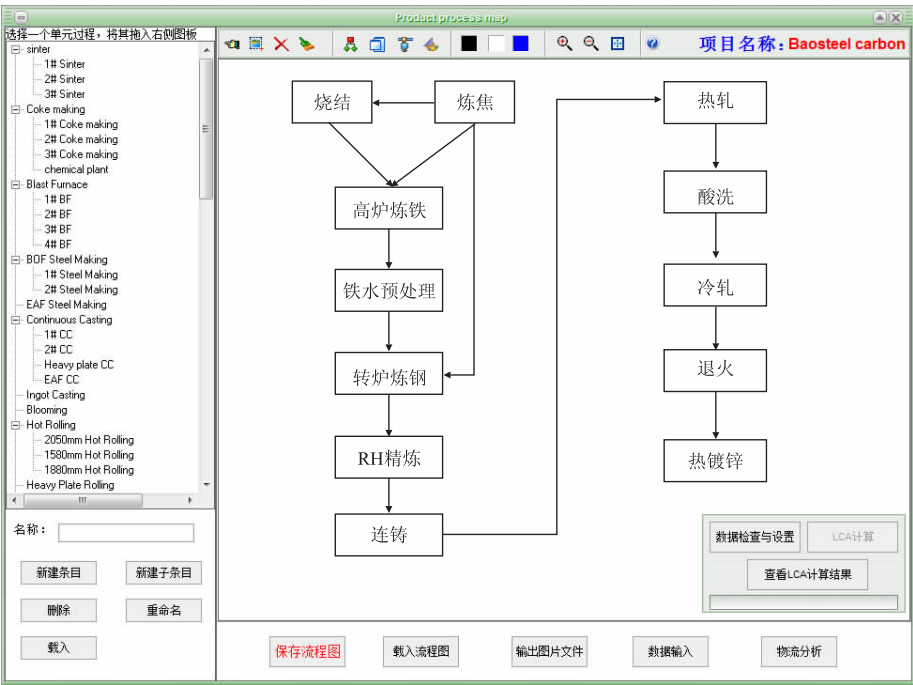


图 2 宝钢 LCA 数据库软件 BaosteelLCA 3.0 建模截图

表 1 生命周期影响评价清单/特征化因子归类^[22,23]

影响类型	清单因子	特征化因子
全球暖化	二氧化碳 ¹⁾ ; 甲烷 ¹⁾ ; 一氧化二氮 ¹⁾ ……	温室气体 100 年内的全球变暖潜力 (kg CO ₂ eq)
酸化	二氧化硫 ¹⁾ ; 氮氧化物 ¹⁾ ……	物质的酸化潜力 (kg SO ₂ eq)
能源消耗	总一次能源	能源的折算为标准煤系数 ^[24] (kgce)
不可再生资源消耗	铁矿石; 煤; 石灰石; 白云石; 锌矿石; 锰矿石……	资源耗竭潜值 (kg Sb eq)
富营养化	氮氧化物 ¹⁾ ; 化学需氧量 ²⁾ ; 总氮 ²⁾ ; 氨氮 ²⁾ ; 总磷 ²⁾ ……	物质的富营养化潜力 (kg PO ₄₃ - eq)

1) 大气污染物; 2) 水体污染物。

钢铁产品 LCA 数据库软件 BaosteelLCA 3.0 进行计算,如图 2 所示。软件采用的计算模型将钢铁企业的生产系统划分为主生产系统和能源生产系统。主生产系统有清晰的上下道工序关系,不同工序产品的 LCA 计算可以按先后顺序进行。能源系统属于公辅系统,每个主工序都使用能源产品,能源产品和主工序产品的 LCA 分开计算,主工序产品 LCA 计算时直接调用能源产品的 LCA 结果。在主生产系统中,LCA 的计算可以按工序计算,也可以按工序的具体单元计算,例如高炉铁水的 LCA 计算可以采用整个烧结工序的数据,也可以采用 1 号烧结机等具体单元过程的数据。

2.3 生命周期影响评价

根据钢铁生产系统的特点,钢铁产品生命周期影响评价的影响类型数据包括全球暖化、酸化、能源消耗、不可再生资源消耗、富营养化、光化学氧化、人体毒性、生态毒性等 8 类。

生命周期影响评价首先是进行归类,即根据清单负荷因子的物理化学性质,将对某影响类型有贡献的因子归到一起的过程。根据钢铁行业生产特点,重点考虑表 1 中所列 5 种环境影响类型,生命周期清单因子和生命周期影响评价特征化因子按表 1 归入各影响类型。

分类评价是定量计算影响类型的类型指标。由于同质量的不同负荷因子对同一种影响类型的贡献潜力不一样,因此必须找到一种共同的度量单位,将各负荷因子的贡献潜力转化后进行汇总。转化为统一度量需要借助于特征化模型,分类评价结果采用当量物质表示,按式(2)计算。

$$C_j = \sum_i Q_{ji} \times m_i$$

(2)

式中, C_j 为影响类型 j 的计算结果; m_i 为生命周期清单因子 i 的清单结果; Q_{ji} 为生命周期清单因子 i 对影响类型 j 的特征化因子,特征化因子来源于表 1

所列特征化模型。

3 LCA 数据库开发过程的分配问题

分配问题是 LCA 研究中的关键问题之一。钢铁生产工序中存在一个单元过程同时产出两种或多种产品、而投入的原材料和能源又没有分开的情况(例如:高炉炼铁工序生产铁水的同时,产生高炉渣、高炉煤气、电等共生产品),也会存在输入渠道有多种、而输出只有一种的情况(例如:废水处理车间的废水来源渠道多种多样)。在这些情况下,不能直接得到清单计算所需的数据,必须根据一定的关系对这些过程的数据进行分配。分配的基本原则和程序在相关 LCA 标准中均有概括性的描述,但对于具体的行业、企业,缺乏可操作性的指导。宝钢 LCA 研究针对钢铁行业中的分配问题提出了可操作性的方法。

产品功能相近的单元过程(类似功能系统)可采用世界资源研究所(WRI)提出的基于物理关系分配法(Allocating based on physical relationship),根据产品的热值、体积、成分含量等物理关系分配负荷。有些单元过程(系统)虽然有多个产品(功能),但产品的功能相近,可以基于物理关系分配法把单元过程的输入和输出分摊给各个产品。例如,制水系统的产品有工业水、过滤水、软水和纯水,但这些产品的功能相近,而且都是以体积为功能单位,可以按照它们消耗原水的系数分摊制水过程的数据。

单元过程的产品功能差距较大的系统称为多功能系统,例如高炉炼铁工序,该工序主要消耗铁矿石、焦炭和煤,产品有铁水、电、高炉煤气和高炉渣等,这些产品功能、价格相差较大,计量单位各不相同,是典型的多功能系统。多功能系统的数据分配比较复杂。宝钢 LCA 数据库研究使用系统扩展法。以高炉为例,把高炉工序的所有输入和输出都归入系统的主功能(铁水),然后减去高炉煤气和高炉渣的替代产品的环境负荷。钢铁生产系统消耗的主要能源是动力煤,高炉渣用作水泥熟料,因此,煤作为高炉煤气的替代品,水泥熟料作为水渣的替代品。

4 宝钢 LCA 数据库的建立与应用

4.1 宝钢 LCA 数据库的建立

宝钢于 2003 年开始开展 LCA 研究,通过十多年的研究,建立了中国钢铁企业的 LCA 研究方法论、钢铁产品生命周期清单的模型化方法和钢铁产

品环境影响评价模型,提出了基于 LCA 的钢铁企业环境决策方法,开发了钢铁产品生命周期评价软件,开展了基于 LCA 的环境管理与决策的应用研究。在这些研究基础上,形成了钢铁行业国家标准《钢铁产品生产生命周期评价技术规范》。

LCA 数据库的建立、升级扩容工作始终伴随着这些研究在同步进行。宝钢产品 LCA 数据库作为企业数据库,其包含的数据集类型主要为基于生产过程的数据集(Process-based),即按宝钢钢铁生产过程逐个收集得到的数据集。宝钢 LCA 数据库数据集包含内部工序 235 个,外部工序 120 个,累计数据量约 50 万条。内部工序包括了烧结、炼焦、炼铁、炼钢、热轧、冷轧等大类工序及其相应的细分到二级、三级或更细的子工序,以及发电、制氧、制水等能源工序。外部工序主要涉及上游供应商和下游用户的部分工序数据,如铁矿石开采、耐火材料生产、汽车零部件加工等。

为配合 LCA 数据库的建立,宝钢开发了“LCA 在线数据采集系统”,该系统采集的基础数据包含生产过程的产品、副产品、原材料消耗、辅助材料消耗、能源消耗以及大气排放、水体排放和固体废弃物排放等 8 大类数据。这些数据涉及各个生产工序、能源公辅系统,分散在不同的系统内并且数据复杂,统计口径粗细不一致。该系统将这些数据从不同的系统抽取、整合到统一的平台,保证数据详细、准确、权威和完整。LCA 系统涉及的产品制造周期中的各类数据分散在不同的系统中,采集上来也只是孤立的、缺乏关联信息的单体数据,难以支撑产品制造周期中的 LCA 关联分析,“LCA 在线数据采集系统”根据产品特点、工艺特点,建立每一物料的全制造流程的信息跟踪模型,并同时附带物料的生产实绩、能源消耗、辅料等信息。根据物料属性,生成明细产品(细到钢种牌号)的全流程 LCA 架构。为避免采集的数据发生错误,系统中建立了数据检验与审定程序,其检验与审定原则包括金属平衡、碳平衡、工序能耗、水平衡等方式。

目前来说,宝钢 LCA 数据库内部生产工序数据质量已经达到较高的水平。但对于外部数据,其主要来源于上游供应商、下游用户以及商业数据库,数据的准确性、一致性、代表性等还有待通过更多的 LCA 应用来进一步提高。

4.2 宝钢 LCA 数据库的应用

宝钢 LCA 数据库主要应用于以下两个方面:

1)企业内部应用研究。LCA 作为一个环境绩效量化方法在宝钢内部主要用于产品生态设计、绿色制造、节能减排、降成本、技术系统化评估等。例如,可用于量化评价全流程环境绩效、量化分析节能减排改进潜力、分析产品环境负荷在各工序的分布、分析同一产品不同产线环境负荷差异、分析废弃物不同再利用方式的环境收益等。

2)结合上下游的产品全价值链研究。LCA 是支撑绿色采购、绿色营销、绿色用钢解决方案等驱动上下游共同绿色的一种有力方法。开展绿色采购研究与实践,逐步建立供应商产品环境绩效 LCA 数据库,条件成熟时,将 LCA 评价结果作为产品准入的重要参考之一。绿色营销与下游绿色用钢研究通过 LCA 量化评价用户用钢生命周期环境负荷,为其提供绿色用钢方案。

例如,在某车型 B 柱小总成设计中,应用 LCA 数据库中的钢铁制造过程、加工方式、汽车运行阶段等过程的 LCA 数据,综合评估各种用钢方案。该车型的 B 柱小总成结构细分到外板、加强板、内板,涉及 QP980、DP780 等 8 个高强钢牌号(如表 2 所示),以及热压成型、激光拼焊等加工成型方式。LCA 分析结果如图 3 所示,B 柱小总成三种新的方案与传统用钢相比,碳排放分别减少 41kg、50kg、45kg。加工过程碳排放的适度增加,带来了使用过程碳排放的大幅减少。

表 2 某车型 B 柱小总成设计方案				
项目	比较基准	方案 1	方案 2	方案 3
外板	B180 1.6 mm	B1500HS 1.4 mm	QP980 1.4 mm	B340/590DP DP780 1.5 mm
加强板	SAPH440 2.9 mm B280VK 2.0 mm	DP780 1.6 mm	DP780 1.6 mm	DP780 1.6 mm
内板	DC04 1.0 mm	B340/590DP 1.0 mm	B340/590DP 1.0 mm	B340/590DP DP780 1.0 mm

5 结论

本文提出了中国钢铁企业 LCA 数据库研究与开发方法,内容包括:

- 1)系统边界与数据范围划分方法,将产品废弃后循环再利用阶段纳入其中,反映该方法的导向性是促进废钢的回收再利用;
- 2)钢铁产品的生命周期清单计算方法,特别是

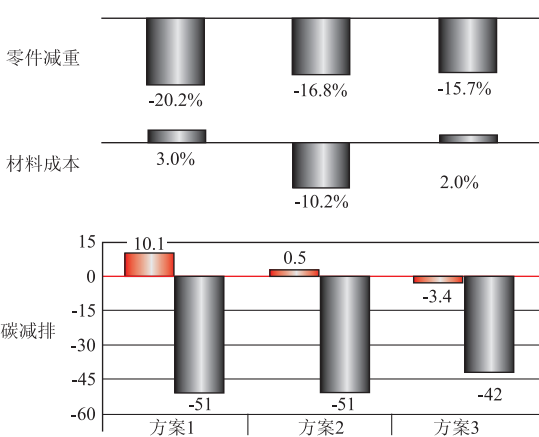


图 3 B 柱小总成不同设计方案的 LCA 比较

针对钢铁企业复杂系统的分配原则,将钢铁生产单元划分为类似功能系统和多功能系统,分别应用物理化学属性和系统扩展法进行分配;

3)钢铁产品生命周期影响评价计算方法。

LCA 作为产品全价值链环境绩效量化评估手段,是钢铁企业辅助材料生态设计、支撑绿色采购、绿色制造、绿色产业的有效工具,而企业 LCA 数据库是支撑这些工作的最重要的基础。建立钢铁产品生命周期数据库,对于在中国钢铁行业推广 LCA 方法及其应用,具有参考意义。

参考文献

[1] 朱晓林,李南姿. 我国钢铁企业环境竞争力影响因素及对策研究[J]. 中国市场,2013,(30):153-154.

[2] JUNGBLUTH N, DONES R, FRISCHKNECHT R. Life cycle assessment of photovoltaics: Update of the ecoinvent database[C]. Harbin: Materials Research Society Press,2007.

[3] MUTEL C L, HELLWEG S. Regionalized life cycle assessment; Computational methodology and application to inventory databases[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43(15): 5797-5803.

[4] NANSAI K, KONDO Y, KAGAWA S, et al. Estimates of embodied global energy and air-emission intensities of japanese products for building a Japanese input-output life cycle assessment database with a global system boundary [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(16): 9146-9154.

[5] SUNDARAVARADAN N, PATNAIK D, RAMAKRISHNAN N, et al. Discovering life cycle assessment trees from impact factor databases [J]. Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence, 2011, 2:1415-1420.

[6] TARDIVEL Y, TESSIER C. DIOGEN: Environmental impact database for life-cycle assessment of civil engineering structures[C]. Vienna: University of Natural Resources and Life Sciences Press, 2012:703-709.

[7] HADDAD A N, DE MORAES SEDREZ M, DE MACEDO PIRES CONDEIXA K, et al. Life cycle assessment: A comparison of ceramic brick inventories to subsidize the development of databases in Brazil[C]. Durham: Trans Tech Publications Ltd Press,2013.

[8] TEIXEIRA R F M. Critical Appraisal of Life Cycle Impact Assessment Databases for Agri-food Materials [J]. Journal of Industrial Ecology, 2015,19(1):38-50.

[9] TAKANO A,WINTER S,HUGHES M, et al. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment [J]. Building and Environment, 2014, 79: 20-30.

[10] 张群. 材料生命周期分析网络数据库的研究与开发[D]. 北京:北京工业大学,2009.

[11] 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

[12] 刘芳,施进发,陆长德. 基于 GIS 的产品生命周期评价数据库设计研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2010,23(3):467-469.

[13] 于亚男,罗云,王景人,等. 特种设备全生命周期风险辨识与数据库的开发[J]. 安全,2012,(9):37-40.

[14] 王卫,李纬光,刘金朝. 基于生命周期的数据库产品动态定价模式[J]. 情报理论与实践,2012,35(2):3531-3534.

[15] 孙艳彬. 机电产品全生命周期评价基础数据库设计[D]. 青岛:大连理工大学,2013.

[16] World steel Association. Life cycle assessment methodology report [R]. Brussels: World steel Association, 2011:1-87.

[17] European Confederation of Iron and Steel Industries (EUROFER). The European Steel Industry's Contribution to an Integrated Product Policy-Final Report[R]. Brussels: EUROFER, 2008:1-140.

[18] Nippon Steel Corporation. NIPPON STEEL Sustainability Report 2010 [R]. Tokyo: Nippon Steel Corporation, 2012: 20-37.

[19] ARCELOR M. Core Strengths, Sustainable Returns Annual report 2011 [EB/OL]. London: ArcelorMittal, 2013-03-12, <http://www.arcelormittal.com/corp/news-and-media/publications-and-reports/annual-reports>.

[20] Tata Steel. 105th Annual Report2011-2012 [R]. Mumbai: Tata Steel, 2012:42.

[21] MAURICE B, FRISCHKNECHT R, COELHO-SCHWIRTZ V, et al. Uncertainty analysis in life cycle inventory. Application to the production of electricity with French coal power plant [J]. Journal of Cleaner Production, 2000, 8(2): 95-108.

[22] Institute of Environmental Sciences-Leiden University. CML-IA Database Version 4.1 [EB/OL]. Leiden: Leiden University,2012-07-04. <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>.

[23] JEROEN B. Guinée, MARIEKE Gorée, REINOUT Heijungs, et al. Handbook on Life Cycle Assessment: Operational guide to the ISO standards[C]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2002: 161-389.

[24] 国家统计局工交司. 能源统计知识手册[M]. 北京:中国统计出版社, 2006:70.

(上接第 555 页)

[10] GRAICHEN K, TREUER M, ZEITZ M. Swing-up of the double pendulum on a cart by feedforward and feedback control with experimental validation [J]. Automatica, 2007, 43(1): 63-71.

[11] 张永立,程会锋,李洪兴. 三级倒立摆的自动摆起与稳定控制[J]. 控制理论与应用,2011,28(1):37-45.

[12] 李祖枢,王育新,谭智,等. 小车二级摆系统的摆起倒立控制与实践[C]//第五届全球智能控制与自动化大会论文集. 杭州:浙江大学出版社,2004,6:2360-2365.

[13] 李祖枢,但远宏,温永玲,等. 小车三级摆摆起倒立的仿人智能控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2004,32(增刊):38-41.

[14] 李祖枢,但远宏,张小川,等. 双摆机器人摆杆平衡态任意转换运动控制的实现[J]. 自动化学报,2010,36(12):1720-1731.

[15] ARIAN V D S. L2 - Gain and passivity techniques in nonlinear control[M]. London:Springer, 2000.

[16] SEPULCHRE R, JANKOVIC M, KOKOTOVIC P V, Constructive Nonlinear Control[M]. London:Springer,1997.

[17] 关肇直,陈翰馥. 线性控制系统的能控性和能观性[M]. 北京:科学出版社,1975.