基于 Simapro 的气动与电动执行器生命周期评价

张业明 蔡茂林

(河南理工大学 机械与动力工程学院,焦作 454000) (北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100191)

摘 要: 在机械性能和工况相近的情况下,对 3 组气动执行器和电动执行器进行生命周期评价(LCA,Life Cycle Assessment),分析了气动和电动执行器的环境影响评价主要因素,确定了两种执行器的 LCA 研究范围、系统边界和时间边界,归纳了两种执行器制造过程的主要工艺和零部件的工艺特征,最后在 Simapro 7.1 中进行了两种执行器的评价框架建立和数据录入,根据 Eco-indicator 99 进行了两种执行器 LCA 对比分析. 结果表明,执行器对资源的环境影响约占环境影响综合值的 50%;机械性能和工况相近的气动和电动执行器,电动执行器的环境影响比气动执行器大.

关 键 词: 气动执行器; 电动执行器; 制造工艺; 环境影响评价; 生命周期评价

中图分类号: TP 215; X 820.3

文献标识码: A **文 章 编 号:** 1001-5965(2014)12-1685-06

Life cycle assessment of pneumatic and electric actuators based on Simapro

Zhang Yeming

(School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Cai Maolin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: In the similar mechanical performance and working condition cases, life cycle assessment (LCA) of three groups of pneumatic actuators and electric actuators was carried on in order to analyze the extent of environmental impact of the actuators. The main environmental impact assessment factors of pneumatic actuators and electric actuators were analyzed. And the scope of the study, system boundaries and time boundaries were determined for the LCA of two kinds of actuators. The main manufacturing process and components processing features of two kinds of actuators were summed up. Finally the evaluation framework establishment and data entry of two kinds of actuators were conducted with Simapro 7.1, and the LCA comparative analysis of two kinds of actuators was carried out with Eco-indicator 99. The result reveals that the resources impact accounts for about 50% of the overall environmental impact value of actuators, and the environmental impact of electric actuators is large than that of pneumatic actuators under the similar mechanical properties and working conditions of these actuators.

Key words: pneumatic actuator; electric actuator; manufacturing process; environment impact assessment; life cycle assessment

收稿日期: 2013-12-13; **网络出版时间:** 2014-09-04 08:41; **DOI:** 10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0767

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/doi/10.13700/j.bh.1001-5965.2013.0767.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1204107,51005237); 河南省高等学校精密制造技术与工程重点学科开放实验室开放基金资助项目(PMTE201318A); 河南理工大学博士基金资助项目(B2012-101); 河南省教育厅科技技术研究重点资助项目(14B460033)

作者简介: 张业明(1979-),男,山东肥城人,副教授,tazhangyeming@163.com.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在生产现场，很多制造系统既可以选择使用气动执行器又可以选择使用电动执行器. 在执行器的方案选择中，除了考虑机械性能、经济属性，还应当考虑执行器的清洁生产性能，研究哪一种执行器系统更符合绿色制造的要求. 采用从摇篮到坟墓(cradle to grave) 的生命周期评价(LCA，Life Cycle Assessment) 能够准确把握执行器的环境影响程度的差异. LCA 已有 40 多年的历史，国际上已经形成了一系列标准(如 IS014040 等) 、环境数据库(如美国、荷兰、日本等国家的数据库) 、环境评价软件(如 Simapro，GaBi，TEAM) . 国内 LCA 的研究起步较晚，北京工业大学在国家“九五”、“十五”的高新技术研究计划、国家自然科学基金等资助下，开展了一系列材料的环境协调性研究[1]. 杨建新等对我国普通钢材生产过程中的能源、物料消耗以及对环境的排放进行了研究[2]. 王洪涛等在 2009 年开始研发 LCA 软件，现已提供 CLCD，ebalance 和 eDesign 等环境评价软件[3]. 林逢春等以两种一次性塑料餐盒为例，在 Simapro 7. 1 软件的支持下，运用 Eco-indicator 99 影响评价模型完成了对两种餐盒的生命周期评价[4]. Hischier 等对等离子电视进行 LCA 研究，指出制造阶段和使用阶段对环境影响最重[5].

当前 LCA 的研究主要集中在材料和生产工艺领域，针对机电产品的 LCA 研究较少，执行器方面还没有完整的生命周期评价案例. 气动和电动执行器是当前机电系统中应用最广泛的执行设备. 本文采用 Eco-indicator 99，借助 Simapro 7. 1，进行气动和电动执行器的 LCA 对比研究，解决两种执行器在相同工况下都能完成既定生产任务的前提下，哪种执行器的环境负荷更少的问题，对机电产品的 LCA 研究意义重大. 两种执行器的 LCA 研究步骤分为目标和范围确定、清单分析、影响评价和结果解释 4 部分.

1 环境影响评价因素分析

两种执行器在原料采集、制造生产、销售使用、报废回收等过程都会对环境产生影响，其环境影响评价因素归纳如下.

1) 在制造环节的环境影响因素有: 原材料的采集、冶炼、加工等阶段产生的能源消耗和环境污染排放，在制造组装和运输销售阶段产生的能源和化石燃料的消耗;

2) 在运行环节的环境影响因素有: 气动执行器消耗压缩空气所产生的压缩机耗电，电动执行器的电能消耗，以及它们维护保养阶段产生的器件的更换、交通等事务所造成的环境影响;

3) 在报废回收环节的环境影响因素有: 废弃物掩埋、焚烧、原材料提取等所造成的环境污染和能源消耗.

2 研究目标和范围的确定

2.1 目标和范围

目标和范围的确定是确定产品系统和系统边界，包括了解产品的生产工艺、确定所要研究的系统边界. 确定研究的目标与范围是清单分析、影响评价和结果解释的出发点和立足点. 研究范围所涉及的要素包括功能单位、初始系统边界、时间边界、数据质量要求等[6].

气动执行器和电动执行器的研究目标就是比较两种执行器在生产制造阶段、运行使用阶段以及报废回收阶段所造成的环境影响的差异，找出两种执行器整个生命周期所消耗资源、能源及排放的废弃物的数据，计算其环境负荷状况. 通过应用调研，选取在执行器市场份额中占有率较高的 3 组执行器进行研究，如表 1 所示.

表 1 执行器研究对象

Table 1 Research objects of actuators

组号	气动执行器		电动执行器	
	名称	型号	名称	型号
1	PA	CDJ2B10-30A	EA	RCS2-RA4C-A-20-6-50-T2-S
2	PB	MY1B25-300H	EB	RCS2-SS8C-A-150-20-300-T2-S
3	PC	CDM2L32-100A	EC	RCS2-RA7BD-A-100-4-100-T2-S

气动执行器和电动执行器的大多数生产企业都是外购零部件或半成品进行再加工，然后组装、喷涂、检测、包装形成产品，最后销售给终端用户. 因此，执行器的 LCA 评价还需要追溯这些零部件或半成品的制造过程. 这些中间产品的环境影响一般采用统计的方法，计算它们的能耗和资源消耗. 执行器的 LCA 研究范围和系统边界如图 1 所示.

2.2 时间边界

时间边界的选择与所确定的评价目的有关. 如果研究目的是分析和确定系统的环境影响，普通的 LCA 即可满足要求; 如果研究目的是为了判断生产过程、生产技术、原材料等的变化引起的环境负荷变化，那就需要采用面向变化的 LCA，将评价结果以时间序列进行比较，找出研究对象的变化和差异.

考虑执行器近几年的环境负荷数据差异不大，因此选取 2009 年的实际数据进行分析，以确定执行器的生产和运行对环境所产生的影响.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

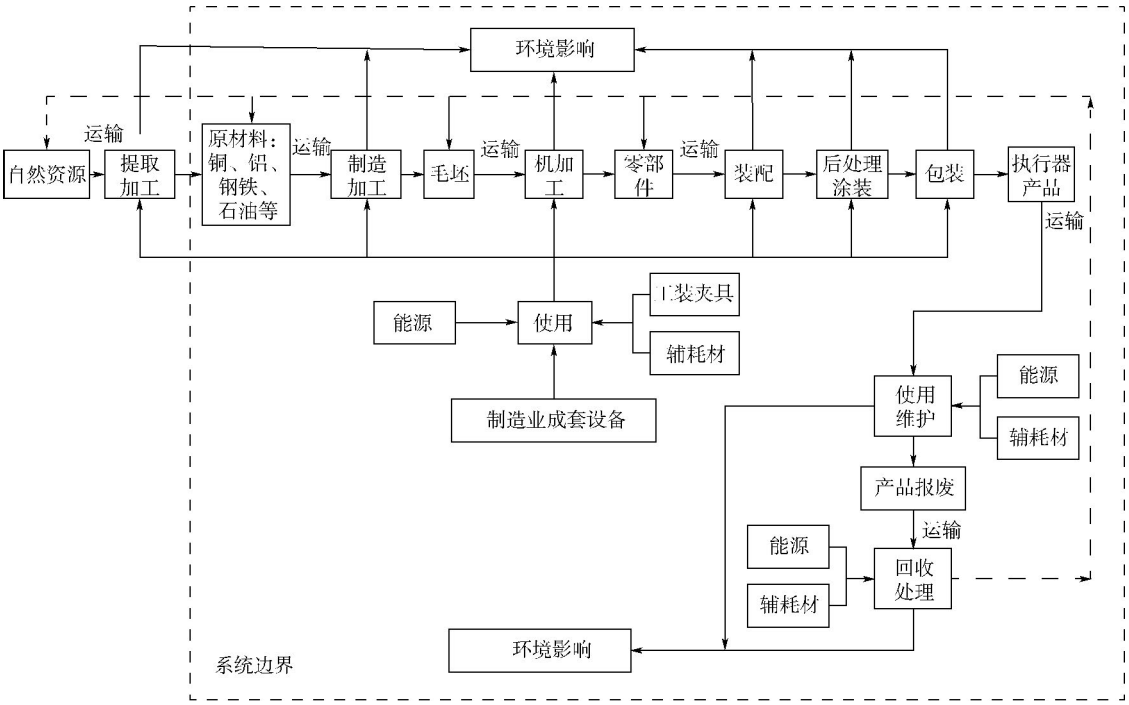

图 1　执行器的 LCA 研究范围和系统边界

Fig. 1　Study scope and system boundaries of actuators LCA

3　清单分析

清单分析数据由资源能源消耗和污染物排放两部分构成. 污染物排放包括直接排放和间接排放. 直接排放是指执行器零部件生产过程(铸造、机加工、涂装等) 中产生的排放; 间接排放是指在原料开采与能源生产过程、运输过程中造成的排放[7].

以执行器为代表的机电产品在进行 LCA 时，机电产品整个生命周期的能源、资源数据很难准确获得，使得 LCA 的清单分析很困难，只好采取统计和估算的方法获得所需的数据.

气动和电动执行器都是按照批量零部件生产再进行组装的方式进行，它们的生产过程如图 2 所示，执行器制造过程的主要工艺如图 3 所示.

3.1　气动执行器清单数据

气动执行器零部件的主要材质是铝合金、钢铁、铜等金属，还有由聚氨酯、丁晴橡胶等有机化合物制作的缓冲密封元件. 在生产线上多种规格的执行器同时生产，执行器的生产量波动也很大，基本都是按照订单和库存量来安排生产量. 因此，无法通过全厂总消耗量求平均值的方法来估算每种执行器生产所消耗的资源. 只有通过气动执行器各零部件的材质、质量、电镀面积、涂装面积等信息估算它们的环境负担，再累加得到气动执行器总的环境影响. 气动执行器零部件的工艺特征如图 4 所示; PA 零部件明细如表 2 所示.

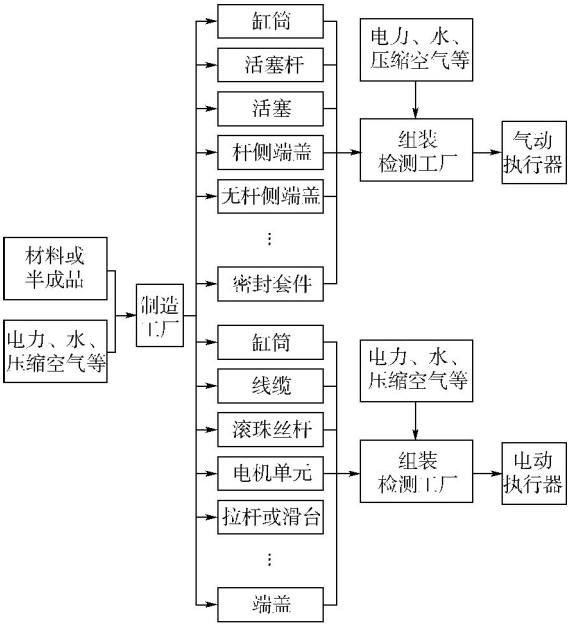

图 2　执行器的生产过程

Fig. 2　Production process of actuators

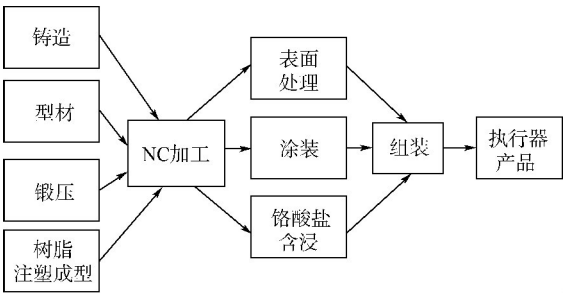

图 3　执行器制造过程的主要工艺

Fig. 3　Main technology of actuator manufacturing process

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

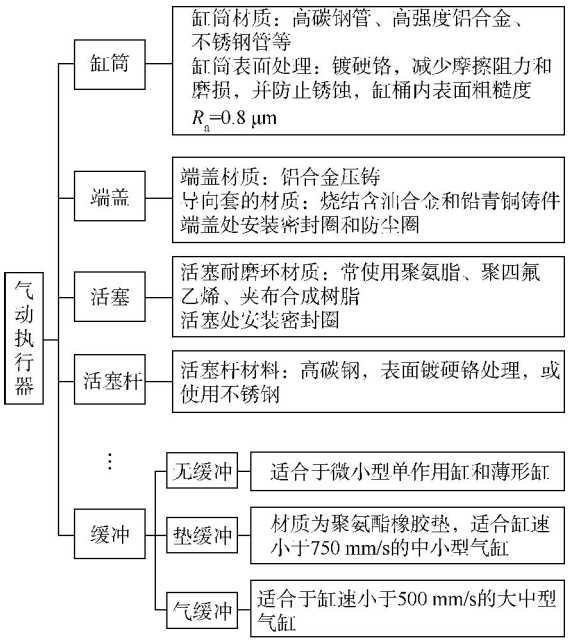

图 4 气动执行器零部件的工艺特征

Fig. 4 Technological characteristics of pneumatic actuator components

表 2 气动执行器 PA 零部件明细表

Table 2 Pneumatic actuators PA parts list

序号	部件名	材料	个数	质量/g	备注
1	杆侧端盖	铝合金	1	5.20	阳极电镀
2	无杆侧端盖	铝合金	1	3.95	
3	缸筒	不锈钢	1	20.60	镀铬
4	活塞杆	不锈钢	1	10.26	
5	活塞	黄铜	1	8.41	
6	安装螺母	黄铜	1	3.85	镀镍
7	杆端螺母	轧制钢材	2	2.59	镀镍
8	缓冲垫	聚氨酯	2	0.18	
10	活塞密封圈	丁腈橡胶	2	0.44	
11	杆密封圈	丁腈橡胶	2	0.01	
12	缸筒密封圈	丁腈橡胶	1	2.67	
13	活塞固定密封圈	丁腈橡胶	2	0.38	
14	缓冲针阀	不锈钢	1	0.14	
15	钢珠	轴承钢	2	0.05	
16	缓冲环	黄铜	1	0.01	
17	缓冲密封圈	丁腈橡胶	2	0.29	
18	缓冲阀密封圈	丁腈橡胶	2	0.01	
19	缓冲环密封圈	丁腈橡胶	2	0.02	
20	脚座	不锈钢	1	9.42	安装固定
21	磁环	橡胶磁体	2	1.68	传感器

注: 质量为考虑切削加工余量零部件加工前的毛坯质量.

3.2 电动执行器清单数据

电动执行器与气动执行器相比，种类较少，零部件的集成度较高，维修拆装较困难，个体性能差别性也很大. 因此，也采用单个执行器的零部件环境负荷累加的方法，进行电动执行器的环境影响清单数据收集. EA 零部件明细如表 3 所示.

表 3 电动执行器 EA 零部件明细表

Table 3 Electric actuators EA parts list

序号	部件名	材料	个数	质量/g	备注
1	缸筒	铝合金	1	67.75	
2	拉杆	不锈钢	1	194.98	
3	拉杆端盖	不锈钢	1	70.48	
4	电机单元转子	铜	1	50.00	
5	电机单元外壳	不锈钢	1	100.00	
6	电机单元定子	汝铁硼	1	75.00	
7	滚珠丝杆螺母机构	不锈钢	1	392.50	
8	螺帽 A	T8/T10/45#	1	35.32	
9	螺帽 B	T8/T10/45#	1	73.23	
10	螺帽 C	T8/T10/45#	1	10.51	
11	电机端盖	铝合金	1	50.00	
12	控制器	电路板	1	250.00	
13	控制器外壳	铝合金	1	550.00	
14	线缆内芯	铜	1	70.00	
15	线缆保护皮	橡胶	1	170.00	
16	线缆拉力线	PVC	1	10.00	

4 Simapro 7.1 执行器评价框架建立

在 Simapro 7.1 中建立执行器产品评价框架，如图 5 所示.

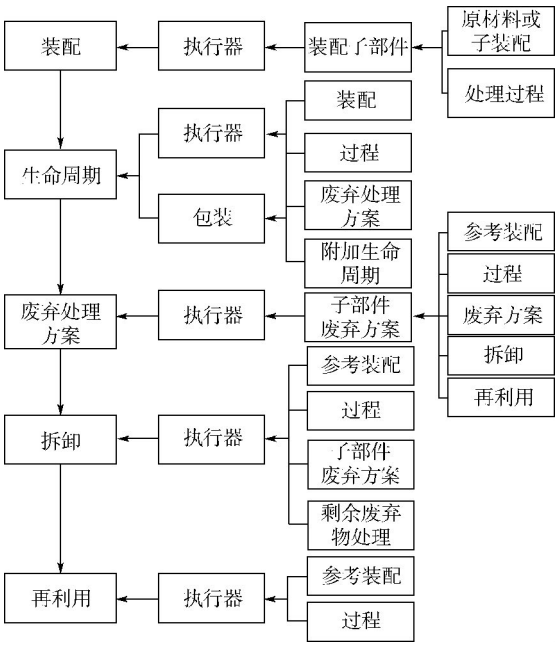

图 5 基于 Simapro 7.1 的执行器评价框架

Fig. 5 Actuator evaluation framework based on Simapro 7.1

该评价框架包含装配、生命周期、废弃处理方案、拆卸、再利用，共 5 层，各层次之间是相互衔接、前后呼应. 结构框架沿着框架的层次结构，逐步将执行器的所有零部件清单数据信息全部录入，在运行期间的能耗也录入进去[8-9]. 执行器拆卸、报废回收方式采取运送至废品回收公司统一回收原材料的方式[10]. 数据录入以气动执行器

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

PA 的缸筒为例,缸筒进行机加工、镀镍、镀铬等处理后,接着运送至装配车间,它的材料和工艺数据录入如图 6 所示.

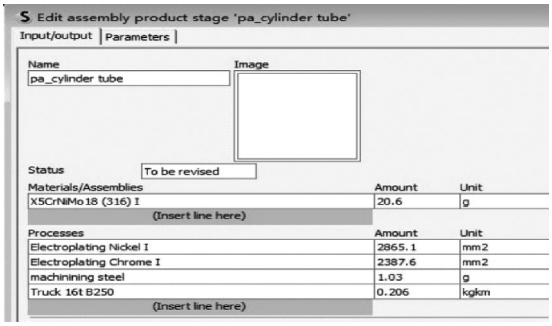

图 6　气动执行器 PA 缸筒的数据录入

Fig. 6　Cylinder Data entry of pneumatic actuator PA

5　环境影响评价和结果解释

目前,国际上也没有统一的环境影响类型分类方法. SETAC 于 1999 年提出的 Eco-indicator 99 分类评估方案至今仍为大部分 LCA 研究所遵循. Eco-indicator 99 的单位是 Pt,它是一个无量纲的基准量,由当地居民总人口去除以当地总的环境负荷再乘以 1 000 得到[11].

气动执行器和电动执行器的环境影响采用 Simapro 7.1 中的 Eco-indicator 99(H) V2.06 评估方案对进行评价. 该方案包含人类健康(human health) 、生态系统健康和资源 3 大类,包含致癌物质(carcinogens) 、呼吸有机物(resp. organics) 、呼吸无机物(resp. inorganics) 、气候变化(climate change) 、辐射(radiation) 、臭氧层破坏(ozone layer) 、生态毒性(ecotoxicity) 、酸化或富营养化(acidification/eutrophication) 、土地使用(land use) 、矿石(minerals) 、化石燃料(fossil fuels) 共 11 个小类[12-13].

将所有执行器的清单数据归类特征化后,得到执行器的环境影响特征化结果[14],再经过环境影响标准化、环境影响加权后,得到 3 组执行器的 11 种环境影响的单一综合值[15],再将 11 种环境影响汇总为人类健康(human health) 、生态系统健康和资源 3 类,最终得到 3 组执行器的环境影响综合值如图 7 所示.

由图 7 可知,6 种执行器对资源的环境影响约占环境影响总值的 50% 左右,对人类健康影响约占环境总影响的 40%. 6 种执行器对环境影响的总值由强到弱顺序为: EB > PB > EC > EA > PC > PA. 所以,3 组执行器的环境影响评价结果为 EA > PA,EB > PB,EC > PC,电动执行器的环境影响程度比相应的气动执行器大.

相同搬运能力的电动执行器和气动执行器在整个生命周期中,电动执行器的 3 个环境指标(人类健康、生态系统健康和资源) 的消耗都比气动执行器大. 这是因为电动执行器零部件比气动执行器多,结构也比气动执行器复杂、精密,且涉及电机、线缆等高能耗高污染器件,因此电动执行器的环境影响程度也比气动执行器大.

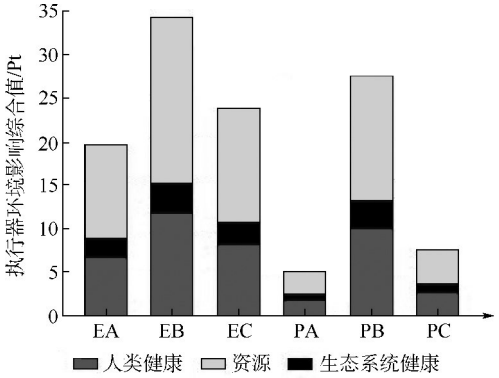

图 7　3 组执行器的环境影响综合值

Fig. 7　Integrated environmental impact values of three groups of actuators

6　结　论

从环境影响的角度,对 3 组机械性能和工况相近的气动和电动执行器进行了 LCA 研究,得出结论:

1) 气动和电动执行器对资源的环境影响约占环境影响综合值的 50%;

2) 机械性能和工况相近的气动和电动执行器,电动执行器的环境影响比气动执行器大.

通过对常规直线搬运工况下的气动执行器和电动执行器的 LCA 比较,气动执行器的环境影响程度比电动执行器小,搬运载荷越多,气动执行器的优势就越明显. 因此,在常规的直线搬运工况下,只要气动执行器能够满足工况要求,尽量选用气动执行器,减少电动执行器的使用.

参考文献 (References)

[1] 张青山,邹华,马军,等. 制造业绿色产品评价体系 [M]. 北京: 电子工业出版社,2010: 10 - 27
Zhang Qingshan, Zou Hua, Ma Jun, et al. Manufacturing green product evaluation system [M]. Beijing: Electronic Industrial Press, 2010: 10 - 27(in Chinese)

[2] 杨建新,刘炳江. 中国钢材生命周期清单分析 [J]. 环境科学学报,2002,22(4) : 519 - 522
Yang Jianxin, Liu Bingjiang. Life cycle inventory of steel products in china [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(4) : 519 - 522(in Chinese)

[3] 亿科环境科技有限公司. 亿科产品与服务概述 [EB/OL].

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2013-04-03]. http://www.itke.com.cn/index.php?_m=frontpage&_a=index
IT & Knowledge for Environment. Summary of product and service about ITKE [EB/OL]. [2013-04-03]. http://www.itke.com.cn/index.php?_m=frontpage&_a=index(in Chinese)

[4] 林逢春,杨凯. 两种一次性塑料餐盒的生命周期评价比较研究[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2004(4):122-128
Lin Fengchun, Yang Kai. Comparison of two kinds of fast food container using the life-cycle assessment (LCA) methodology [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2004(4):122-128(in Chinese)

[5] Hischier R, Baudin I. LCA study of a plasma television device [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2010, 15(5):428-438

[6] 王晓伟,李剑峰,李方义,等. 机电产品生命周期评价指标与量化方法研究[J]. 山东大学学报:工学版,2009, 39(5):73-78
Wang Xiaowei, Li Jianfeng, Li Fangyi, et al. A life cycle assessment indicators system and quantification methods of electromechanical products [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2009, 39(5):73-78(in Chinese)

[7] Junnila S. Life cycle management of energy-consuming products in companies using IO-LCA [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(5):432-439

[8] 张业明,蔡茂林. 气动执行器与电动执行器的运行能耗分析[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(5):560-563
Zhang Yeming, Cai Maolin. Energy consumption analysis for pneumatic actuator and electric actuator [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(5):560-563(in Chinese)

[9] 张业明,蔡茂林. 气动执行器的全生命周期成本分析[J]. 北京航空航天大学学报,2011,37(8):1006-1010
Zhang Yeming, Cai Maolin. Whole life-cycle costing analysis of pneumatic actuators [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(8):1006-1010(in Chinese)

[10] 郭焱,刘红超,郭彬. 产品生命周期评价关键问题研究评述[J]. 计算机集成制造系统,2014,20(5):1141-1148
Guo Yan, Liu Hongchao, Guo Bin. Review of key issue on product life cycle assessment [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(5):1141-1148(in Chinese)

[11] Helias A U H, Olivier J, Greg N, et al. UNEP/SETAC life cycle initiative: background, aims and scope [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(4):192-195

[12] 杨洁,王洪涛,周君. 铁路运输生命周期评价初探[J]. 环境科学研究,2013,26(9):1029-1034
Yang Jie, Wang Hongtao, Zhou Jun. Life cycle assessment of Chinese railway transportation [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(9):1029-1034(in Chinese)

[13] Boughanmi W, Manata J P, Roger D, et al. Life cycle assessment of a three-phase electrical machine in continuous operation [J]. Electric Power Applications, IET, 2012, 6(5):277-285

[14] Tao F, Zuo Y, Xu L D, et al. Internet of things and BOM-based life cycle assessment of energy-saving and emission-reduction of products [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2):1252-1261

[15] Zhang Y M, Cai M L. Overall life cycle comprehensive assessment of pneumatic and electric actuator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3):584-594

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net