

# 再制造产品服务系统生命周期评价建模及应用

郑汉东<sup>1,2</sup> 陈 意<sup>1</sup> 李恩重<sup>2</sup> 史佩京<sup>3</sup> 徐滨士<sup>2</sup>

1. 合肥工业大学管理学院, 合肥, 230009
2. 陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京, 100072
3. 河北京津冀再制造产业技术研究院, 河间, 062450

**摘要:**基于再制造和产品服务系统的特征提出了再制造产品服务系统(RPSS)的概念,根据生命周期评价(LCA)方法框架建立了RPSS LCA模型,并以柴油发动机RPSS为案例对模型开展应用研究。研究发现,确保再制造产品质量和性能不低于新品,避免产品使用过程中消耗大于新品是企业通过实施RPSS获得环境效益的关键;企业开展面向再制造的产品设计,提高产品再制造率,可以降低RPSS生命周期环境影响;RPSS可以为企业提供稳定的旧件来源,提高企业市场竞争力。

**关键词:**再制造产品服务系统;生命周期评价;环境影响;环境效益

**中图分类号:**N945.16

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2018.18.005

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## LCA Modeling and Applications for RPSS

ZHENG Handong<sup>1,2</sup> CHEN Yi<sup>1</sup> LI Enzhong<sup>2</sup> SHI Peijing<sup>3</sup> XU Binshi<sup>2</sup>

1. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei, 230009
2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering, Beijing, 100072
3. Jing-Jin-Ji Institute of Remanufacturing Industry Technology, Hejian, Hebei, 062450

**Abstract:** Based on the features of remanufacturing and product-service systems, a concept of RPSS was proposed. The LCA model of RPSS was established according to the LCA method framework, and the applications of the model were carried out using diesel engine RPSS as a case study. Results show that the quality and performance of remanufactured products are not inferior to those of new products, which is the key for enterprises to obtain environmental benefits through the implementation of RPSS. Enterprises may develop products designed for remanufacturing to improve the remanufacturing rate of products and reduce RPSS life cycle environmental impact. RPSS may provide enterprises with stable sources of used parts and improve their market competitiveness.

**Key words:** remanufacturing product-service system(RPSS); life cycle assessment(LCA); environmental implication; environmental benefit

## 0 引言

再制造是将废旧产品恢复到质量和性能同新品一样的过程。通过实施再制造,企业可以最大限度地利用废旧产品中蕴含的资源,缓解资源短缺与产品需求之间的矛盾,减少报废产品对环境的危害。相比新品,再制造产品的成本降低50%,

同时能耗和材料消耗分别减少60%和70%<sup>[1]</sup>。欧美发达国家再制造产业经过多年发展,已经形成了成熟的技术、产品和市场体系。然而,我国再制造市场目前仍处于试点阶段,只有少量的原始设备制造商开展了再制造业务,如中国重汽集团济南复强动力公司对发动机和汽车零部件的再制造。多数原始设备制造企业没有认识到再制造对构建闭环供应链与变革产品服务系统的重要作用,与此同时,消费者对再制造产品的绿色形象和质量认可度较低,导致目前企业开展再制造的积

**收稿日期:**2018-04-02

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2017YFF0207905);国家自然科学基金资助重大项目(71690235);国家自然科学基金资助项目(51805540)

极性不高<sup>[2]</sup>。

作为实现制造企业可持续发展的解决方案,产品服务系统(product-service system, PSS)发挥着重要的作用<sup>[3-6]</sup>。在研究再制造企业发展的过程中,一些学者将PSS模式引入其中,得出许多重要结论。梁玲等<sup>[7]</sup>认为产品服务和再制造的增值已经超过传统实体生产的价值创造,开始向“小产品大服务”的商业模式演进。周文泳等<sup>[8]</sup>以瑞典BT叉车公司为案例,研究了PSS对再制造业务的促进作用,研究发现PSS不仅有利于企业获得再制造原料,获取再制造相关信息,还有利于再制造产品销售。刘宇熹等<sup>[9]</sup>研究了企业和消费者双方努力程度对再制造下租赁产品服务系统绩效的影响,研究发现企业提供优质服务的努力和用户精心使用产品的努力既会影响到使用期间的服务数量和成本,也会影响到退租产品的质量和使用寿命。

上述文献主要集中于再制造业务发展和再制造产品服务等方面的研究,忽略了再制造系统中非常重要的环境效益部分。再制造被认为在节能、节材、环保方面具有良好的效益<sup>[10-11]</sup>, PSS下的再制造环境影响如何评价是值得研究的问题。生命周期评价(life cycle assessment, LCA)方法是一种用于评价产品或服务相关的环境因素及其整个生命周期环境影响的最有力工具<sup>[12]</sup>。目前,有关PSS下的再制造产品LCA研究较少。因此,本文提出了再制造产品服务系统(remanufacturing product-service system, RPSS)的概念,基于RPSS的功能和特征,根据LCA方法框架建立了RPSS LCA模型及流程,最后以柴油发动机RPSS为案例对模型进行分析和讨论。

## 1 RPSS的概念及其生命周期评价建模

### 1.1 RPSS的概念及模型

再制造产品服务系统(RPSS)是一种企业为客户提供再制造产品和服务组合的商业模式, RPSS包括旧件回收、废旧产品修复或升级、再制造产品租赁等内容,是以再制造产品功能为导向的服务模式。例如,我国目前在汽车零部件领域试点实施的“以旧换再”服务,消费者可以将报废的汽车发动机或变速箱返还给再制造试点企业,并以置换价购买再制造产品。再制造企业通过实施RPSS一方面为消费者提供了报废产品处置的服务,同时还提供了质优价廉的再制造产品以满足消费者的使用需求。RPSS提供商可以是原始

设备制造商(original equipment manufacturer, OEM),也可以是第三方独立再制造商。企业实施RPSS主要包含旧件回收、拆解、清洗、检测、修复或升级改造、装配、测试、销售运输、再制造产品使用报废后的处置等过程。

RPSS LCA模型见图1, LCA评价的系统边界通常包括“摇篮到大门”和“大门到坟墓”。建立RPSS LCA模型是为了定量分析企业实施再制造战略所产生的资源、能源消耗以及产生的环境排

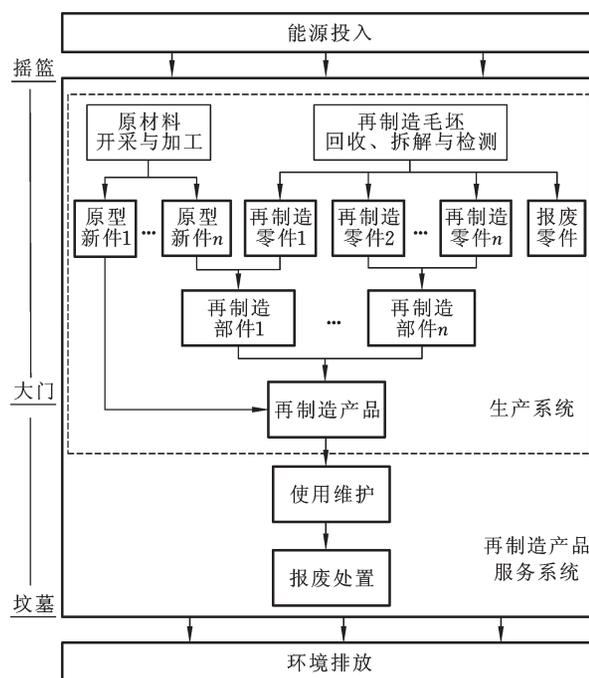


图1 RPSS LCA模型

Fig.1 RPSS LCA model

放。RPSS生命周期评价建模的第一步是分析再制造产品和服务的基本特征,企业通过回收废旧产品,经过拆解、清洗、检测,得到可以再制造的零部件和不可再制造的报废件。可再制造零部件需要经过一系列再制造技术进行修复或性能升级,报废件则进行更换处理,需要收集分析RPSS生产系统中的消耗和排放清单数据。与传统的产品环境效益分析不同的是,基于LCA的RPSS消耗与排放统计不仅存在于再制造工厂内部,还包含再制造产品供应链的环境影响调查。尤其是针对RPSS消耗的电能、水资源、各种零件和辅材,需要调查这些消耗的环境影响,以及生产这些上游产品所产生消耗及排放水平,直至追溯到原始资源的开采与排放,因此RPSS LCA建模的第二步是调查再制造产品系统的消耗所涉及的上游生产过程的环境影响,调查范围涵盖了从“摇篮到大门”整个过程。对于消费型再制造品,还应追溯产品出厂之后的生命周期下游各个阶段,包括使用维

护、报废处置等过程,RPSS LCA建模的第三步则涵盖了“大门到坟墓”的整个过程。RPSS通过回收消费者手中的废旧产品,可以避免同型产品零部件的生产,降低资源、能源消耗和排放。但是,废旧产品回收、拆解、清洗、检测和修复加工过程同样产生一定的消耗和排放,特别是不可再制造件的报废与换新件生产,仍然会产生一定的消耗和排放,因此需要定量分析和综合评价。

## 1.2 RPSS LCA 流程

根据生命周期评价指南<sup>[13]</sup>,RPSS LCA模型主要包含4个组成部分,见图2。

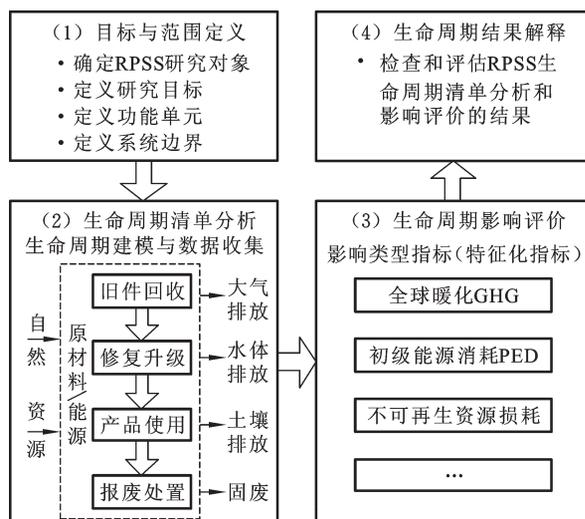


图2 RPSS LCA 流程

Fig.2 RPSS LCA process

(1)目标与范围定义。首先确定RPSS的研究对象,具体包括产品型号和服务方式。然后定义研究目标,帮助企业识别RPSS产生的主要环境影响类型及其生命周期阶段,为企业改进商业模式提供参考。其次是定义功能单元,包括何种数量、质量的产品或产品服务组合,使用多长时间,报废后如何处置等。最后确定系统边界,找出RPSS与环境或其他产品系统之间的界面,RPSS所包含的阶段以及可以忽略的过程。

(2)生命周期清单分析。RPSS生命周期清单分析主要采集旧件回收、再制造修复升级、产品使用和报废处置4个过程中发生的资源消耗和环境排放数据,说明数据来源和数据质量。通常,RPSS的数据主要来源于两方面,一是实景过程数据,主要统计企业实施RPSS各个过程中的消耗和排放数据;二是背景过程数据,主要关联背景数据库,直接调用数据库中的电力、燃油、钢铁冶炼加工等大宗原材料和基础能源的LCA数据集。

(3)生命周期影响评价。生命周期影响评价

运用定量的方法分析RPSS潜在的资源能源消耗、生态健康等环境影响。影响评价主要包括选择影响类型(如全球变暖、非生物资源消耗等),将清单分析结果分类到相应的环境影响类型,以及运用科学的当量因子将清单的环境影响进行量化。

(4)生命周期结果解释。生命周期结果解释主要是检查和评估RPSS生命周期清单分析和影响评价的结果。结果解释包括重大环境影响的识别,在完整性、敏感性和一致性分析基础上对生命周期影响结果的评价、最后结论的解释和建议的提出等。

## 2 发动机RPSS LCA 案例研究

### 2.1 目标与范围定义

本文选取WD615.87型再制造斯太尔柴油发动机为产品对象,对企业为客户提供旧件回收、再制造修复升级和产品报废处置等服务组合的RPSS进行研究。功能单位设定为回收并再制造WD615.87型柴油发动机1台,用于重型柴油货车(10 t)运输 $5 \times 10^5$  km,使用报废后回收至拆解厂进行材料回收处理。案例采用2017年济南复强动力有限公司实际生产数据,选择3种环境影响类型指标进行计算,分别为全球变暖潜值(global warming potential, GWP)、初级能源消耗(primary energy demand, PED)和非生物资源消耗潜值(abiotic depletion potential, ADP),并采用亿科环境科技有限公司研发的在线LCA分析软件eFootprint进行RPSS全生命周期建模,RPSS LCA评价过程中涉及的大宗原材料和能源的消耗、排放数据来源于中国生命周期参考数据库(CLCD)<sup>[14]</sup>、欧盟ELCD(European reference life cycle database)数据库和瑞士的Ecoinvent数据库。该研究代表的是企业水平,LCA分析结果可以为相关企业实施RPSS提供参考,也可以为原始新品生产消费系统的环境影响分析对比提供参考。

### 2.2 生命周期清单分析

#### 2.2.1 旧件回收

根据调研,该企业从全国77家维修站回收发动机旧件,通过统计2017年全年从各个站点回收旧件的数量,以及各站点到再制造工厂的运输距离,计算得到平均回收1台再制造毛坯(发动机旧件)的运输距离,运输过程的能耗与排放数据来源于CLCD数据库,回收过程的清单数据见表1。

表1 再制造发动机回收过程清单数据

Tab.1 Recovery process inventory data of remanufactured engine

	清单名称	数量	单位	上游数据来源	用途/排放原因
过程	再制造发动机回收	1	item		回收再制造
消耗	卡车运输	800	t·km	CLCD-China-ECER	旧件回收运输过程主要消耗柴油

2.2.2 发动机再制造修复与升级

发动机再制造修复与升级过程包含从发动机旧件进厂到再制造发动机包装入库完成,再制造工艺流程图见图3。我们将发动机再制造分为若干个典型过程,如拆解、清洗、检测、修复、组装、测试、包装等,统计了每个过程平均1台发动机的能耗,忽略了零部件工厂内部运输能耗和排放。该过程数据来源于企业调研,再制造发动机的主要原料是发动机旧件和更新件,加工过程的主要消耗为电能和柴油,耗能设备包括高温高压清洗机、超声波清洗机、高温分解炉、悬挂式抛丸机、高温热处理炉、齿轮磁粉探伤系统、纳米复合电刷镀设备、高速电弧喷涂系统、激光熔覆再制造成形系统、车床、珩磨机等。发动机再制造修复与升级过程消耗与排放的清单数据见附件。

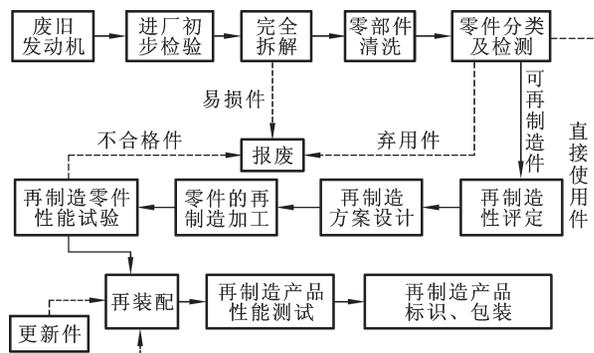


图3 再制造发动机工艺流程

Fig.3 Technological process for remanufactured engine

2.2.3 再制造发动机使用

客户获得再制造发动机后,主要用于重载卡车运输。研究设定再制造发动机使用寿命与新品一致,为重型柴油车货车(10 t)运输 $5 \times 10^5$  km。使用过程产生的能耗和排放数据来源于CLCD数据库,使用过程清单数据见表2。

表2 使用过程清单数据

Tab.2 Service process inventory data of remanufactured engine

	清单名称	数量	单位	上游数据来源	用途/排放原因
过程	再制造发动机使用	1	item		客户业务运输
消耗	使用过程消耗与排放	$5.000 \times 10^5$	t·km	CLCD-China-ECER	运输过程主要消耗柴油

2.2.4 再制造发动机废弃

再制造发动机废弃后的处置方式主要为资源回收,运输至拆解厂的距离为50 km,拆解得到的主要可再生材料为铝合金、合金钢、铸铁等。据企业统计,再制造发动机报废后的回收率为80%,再生原料回收率为95%,假设再生材料产率为100%,抵扣的初生材料计算公式为

$$P = ZR_w R_r R_m Q / 2$$

其中,Z为含量, $R_w$ 为产品回收率, $R_r$ 为再生原料回收率, $R_m$ 为再生材料产率,Q为品质修正系数。再制造发动机报废后可再生成分见表3,再制造发动机废弃过程清单数据见表4。

表3 再制造发动机回收可再生成分统计

Tab.3 Renewable materials of remanufactured engine

可再生成分	含量 Z(kg)	产品回收率 $R_w(\%)$	再生原料回收率 $R_r(\%)$	再生材料产率 $R_m(\%)$	品质修正系数 Q	抵扣的初生材料 P(kg)
钢	188	80	95	100	0.9	64
铸铁	578	80	95	100	0.9	198
铝合金	40	80	95	100	0.85	13

表4 再制造发动机废弃过程清单数据表

Tab.4 Scrap process inventory data of remanufactured engine

	清单名称	数量	单位	上游数据来源
过程	再制造发动机废弃	1	item	
消耗	报废回收运输	50	t·km	CLCD-China-ECER
消耗	废铝	-13	kg	CLCD-China-ECER
消耗	废钢	-64	kg	CLCD-China-ECER
消耗	废铁	$-1.980 \times 10^2$	kg	CLCD-China-ECER

2.3 生命周期影响分析

基于RPSS模式的再制造斯太尔WD615.87型柴油发动机全生命周期环境影响分析结果见表5。其中GWP为84 100 kg二氧化碳当量(kg CO<sub>2</sub> eq.), PED为960 500 MJ, ADP为0.336 kg 锑当量(kg antimony eq.)。

表5 再制造发动机LCA结果

Tab.5 LCA results of remanufactured engine

环境影响类型指标	影响类型指标单位	LCA结果
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq.	$8.410 \times 10^4$
PED	MJ	$9.605 \times 10^5$
ADP	kg antimony eq.	0.336

发动机RPSS全生命周期各阶段环境影响百分比见图4,同绝大多数能耗产品相似,再制造发动机使用过程为最主要的消耗和排放过程,LCA结果占全生命周期环境影响的99%以上。

过程名称	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	PED (MJ)	ADP (kg antimony eq.)
再制造发动机	100.00%	100.00%	100.00%
现场贡献	0%	0%	0%
再制造发动机生产	0.87%	1.22%	0.89%
再制造发动机使用	99.87%	99.60%	100.19%
再制造发动机废弃	-0.91%	-0.96%	-1.23%
再制造发动机回收	0.17%	0.14%	0.14%

图4 发动机RPSS全生命周期各阶段环境影响百分比

Fig.4 Percentage of environmental impact of engine RPSS life cycle

再制造发动机生产过程各环节LCA结果见图5,更新件生产过程和再制造修复过程是主要的消耗排放过程,且更新件生产过程LCA结果大于可再制造件修复过程LCA结果。其次是清洗、包装、检测、测试等过程。

过程名称	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	PED (MJ)	ADP (kg antimony eq.)
再制造发动机生产	100.00%	100.00%	100.00%
现场贡献	0%	0%	0%
拆解	0.33%	0.51%	0.80%
清洗	5.43%	6.98%	5.05%
检测	2.28%	1.90%	0.32%
修复	39.12%	36.14%	27.07%
更换新件	46.04%	41.36%	33.71%
组装	0.33%	0.51%	0.80%
测试	0.80%	2.23%	2.82%
包装	5.66%	10.37%	9.44%

图5 再制造发动机生产过程各环节LCA结果

Fig.5 LCA results of remanufactured engine production process

再制造发动机生产过程GWP、PED、ADP的 Pareto图和双饼图见图6和图7。以全球暖化指标

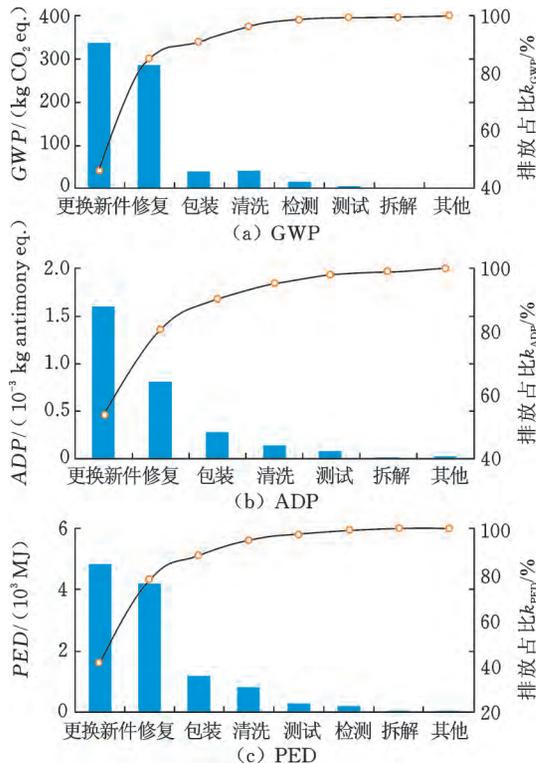
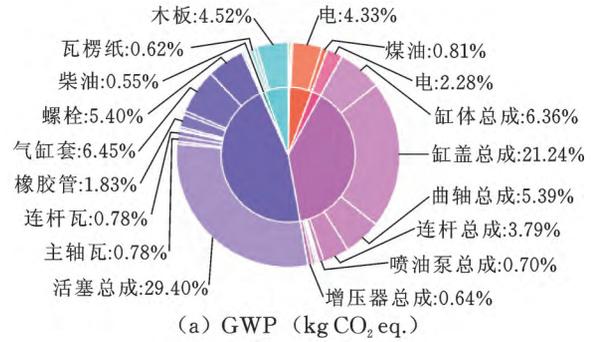
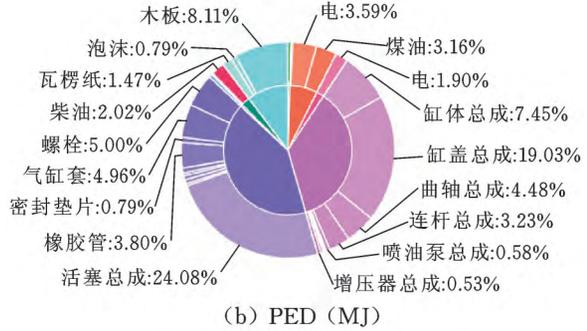


图6 再制造发动机生产过程 Pareto 图

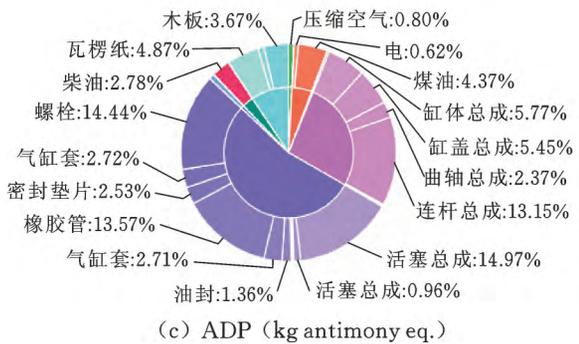
Fig.6 The Pareto diagram for remanufactured engine production process



(a) GWP (kg CO<sub>2</sub> eq.)



(b) PED (MJ)



(c) ADP (kg antimony eq.)

图7 再制造发动机生产过程双饼图

Fig.7 The pie graph for remanufactured engine production process

为例,更换新件和修复2个过程的排放占到整个生产过程的80%以上,其中缸盖总成修复、活塞总成换件是这2个过程环境影响的主要因素。

### 2.4 生命周期结果解释

本研究基于如下设定:①参考国内外再制造产品LCA研究热点,将RPSS系统边界定为从旧件回收开始,废旧发动机回收之前的生命周期各个阶段消耗和排放未纳入系统边界之内;②假设回收的每一台发动机旧件都可以再制造,即旧件再制造率为100%;③RPSS LCA模型忽略了生产过程中零部件在工厂内部的运输能耗,以及再制造发动机客户维护过程的材料和能源消耗。

本研究具有以下几点局限性:①再制造过程需要更换的易损件如密封件、紧固件等通常是企业外部采购,涉及多个上游供应链企业,数据收集存在困难。案例将CLCD数据库中的背景数

据作为零部件的近似值(如密封件用橡胶材料近似表示,螺栓用碳钢材料近似表示),计算结果考虑了数据质量的不确定度。②案例数据来源于我国最早从事发动机再制造的中国重汽济南复强动力有限公司,其生产规模和技术处于国内先进水平。因此,案例研究得到的该型柴油发动机 RPSS 全生命周期环境影响结果仅代表特定企业和特定方案水平,无法代表该产品再制造行业的

平均状况。

案例研究采用的取舍规则以各项原材料投入占产品质量或过程总投入的质量比为依据,忽略物料总质量占比为 0.34%。报告采用 CLCD 质量评估方法,在 LCA 软件系统上完成对模型清单数据的不确定度评估,数据质量评估结果见表 6,经专家咨询,所得评估结果有效,符合方案实际。

表 6 再制造发动机 LCA 评价数据质量评估结果

Tab.6 Data quality assessment results of remanufactured engine LCA

指标名称	缩写(单位)	LCA 结果	结果不确定度	上下限范围(95%置信区间)
全球暖化潜值	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	8.41×10 <sup>4</sup>	±19.16%	[6.80×10 <sup>4</sup> , 1.00×10 <sup>5</sup> ]
初级能源消耗	PED (MJ)	9.61×10 <sup>5</sup>	±21.76%	[7.51×10 <sup>5</sup> , 1.17×10 <sup>6</sup> ]
非生物资源消耗	ADP (kg antimony eq.)	3.36×10 <sup>-1</sup>	±16.24%	[2.82×10 <sup>-1</sup> , 3.91×10 <sup>-1</sup> ]

### 3 讨论

(1)RPSS 的 LCA 主要涵盖旧件回收、再制造修复升级、产品使用和报废处置 4 个阶段。以柴油发动机 RPSS 为例的高耗能再制造产品服务系统,其 LCA 环境影响主要来源于使用阶段。柴油生产及其上游过程和发动机消耗柴油产生的排放造成的环境影响占产品全生命周期环境影响的 99% 以上,因此,确保再制造产品质量和性能不低于新品,避免产品使用过程的消耗大于新品是企业通过实施 RPSS 获得环境效益的关键。

(2)柴油发动机 RPSS 生产过程的环境影响主要表现在两方面:一是可再制造零部件修复和升级过程产生的环境影响;二是更新件制造过程产生的环境影响。从清单分析结果来看,再制造更新件制造所产生的环境影响大于可再制造零部件修复产生的环境影响,因此,企业开展面向再制造的产品设计(design for remanufacturing, DfR),提高发动机零部件再制造率,降低易损件和不可再制造件的数量(或质量),可以降低 RPSS 生命周期环境影响。

(3)柴油发动机再制造修复过程中,高温清洗、电弧喷镀和激光熔覆等技术会消耗大量电能、柴油和一定的金属辅料,小批量再制造无法获得规模效益,因此,企业通过实施 RPSS,在新品销售过程中与客户达成旧件回收契约,可以更好地管理回收产品流,为再制造生产提供稳定的旧件来源,可以提高再制造批量规模,同时有助于形成良好的客户关系,提高企业市场竞争力。

(4)再制造产品一般为蕴含较大价值的复杂

耐用产品,包含多种不同材质、尺寸和重量的零部件,涉及多家零部件供应商。RPSS LCA 评价不仅包含再制造企业生产过程,还涉及供应链上下游企业的生产过程。提高 RPSS LCA 结果的精确度,需要上下游企业密切配合,因此,RPSS 供应链企业采用统一的清单数据统计、核算、分配和评价是未来企业和行业开展 RPSS LCA 的重点。

### 4 结语

本文基于再制造和产品服务系统的特征提出了再制造产品服务系统(RPSS)的概念。针对目前 RPSS 环境影响评价缺失的问题,本文根据生命周期评价(LCA)方法框架建立了 RPSS LCA 模型,并以柴油发动机 RPSS 为案例对模型开展应用研究,可为企业开展 RPSS LCA 提供参考。通过 RPSS LCA,可以帮助制造/再制造企业从传统的产品导向发展模式向服务导向的发展模式转型过程中,找到一种更加低碳、环保的路径,实现企业绿色可持续发展。

#### 参考文献:

- [1] 徐滨士,马世宁,刘世参,等. 21 世纪的再制造工程[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 45-48.  
XU Binshi, MA Shining, LIU Shican, et al. Remanufacturing Engineering in 21st Century[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(1/2): 45-48.
- [2] 郑汉东,陈意,李恩重,等. 政府推动再制造产业发展的演化博弈策略研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(3): 340-347.  
ZHENG Handong, CHEN Yi, LI Enzhong, et al. Re-

- search on Evolutionary Game Strategy of Promoting Development of Remanufacturing Industries by Government[J].China Mechanical Engineering, 2018, 29(3):340-347.
- [3] MONT O K. Clarifying the Concept of Product-service System [J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(3):237-245.
- [4] GUIDAT T, BARQUET A P, WIDERA H, et al. Guidelines for the Definition of Innovative Industrial Product - service Systems (PSS) Business Models for Remanufacturing [J]. Procedia CIRP, 2014, 16(2):193-198.
- [5] REIGADO C R, FERNANDES S D C, SAAVEDRA Y M B, et al. A Circular Economy Toolkit as an Alternative to Improve the Application of PSS Methodologies[J].Procedia CIRP, 2017, 64:37-42.
- [6] AGRAWAL V V, FERGUSON M, TOKTAY L B, et al. Is Leasing Greener than Selling? [J]. Management Science, 2012, 58(3):523-533.
- [7] 梁玲, 谢家平. 闭环产品服务系统的增值分析与协调机理研究[J]. 当代经济管理, 2014, 36(8):19-22.  
LIANG Ling, XIE Jiaping. A Study on the Value-added Analysis and the Coordination Mechanism of the Closed-loop Product Service System [J]. Contemporary Economic Management, 2014, 36(8):19-22.
- [8] 周文泳, 胡雯, 尤建新, 等. 产品服务系统下的机电产品再制造模式——基于BT公司的案例分析[J]. 管理案例研究与评论, 2012, 5(2):105-113.  
ZHOU Wenyong, HU Wen, YOU Xinjian, et al. A General Model of Remanufacturing for Electromechanical Products Considering Product-service System: a Case Study of BT Industries [J]. Journal of Management Case Studies, 2012, 5(2):105-113.
- [9] 刘宇熹, 谢家平. 再制造下租赁产品服务系统节约共享契约研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(3):99-108.  
LIU Yuxi, XIE Jiaping. Shared-saving Contracts for Leased Product Service System Based on Remanufacturing [J]. Chinese Journal of Management Science, 2016, 24(3):99-108.
- [10] 邓乾旺, 李卫明, 李珣, 等. 机械产品回收与再制造系
- 统中绿色影响因子关联仿真模型[J]. 中国机械工程, 2015, 26(22):3064-3075.
- DENG Qianwang, LI Weiming, LI Xun, et al. Associated Simulation Model of Key Green Factors in Recycling and Remanufacturing System of Mechanical Products [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(22):3064-3075.
- [11] 王秋成, 魏瑞晖, 张启炯. 废旧轿车无级变速箱再制造工艺的碳排放评估[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18):2224-2230.  
WANG Qiucheng, WEI Ruihui, ZHANG Qijiong. Assessment of Carbon Emissions of Remanufacturing Processes of Used CVT [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(18):2224-2230.
- [12] International Organization for Standardization. ISO 14044: 2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines [S]. Geneva: ISO, 2006.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 24044-2016 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, 2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 24044-2016 Environmental Management: Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [14] 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.  
LIU Xialu, WANG Hongtao, CHEN Jian, et al. Method and Basic Model for Development of Chinese Reference Life Cycle Database [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10):2136-2144.

(编辑 王晏玥)

作者简介: 郑汉东, 男, 1985年生, 博士研究生。研究方向为再制造工程管理与标准化。发表论文10余篇。李恩重(通信作者), 男, 1985年生, 讲师。研究方向为再制造工程管理与技术标准。发表论文10余篇。E-mail: enzhongl@sina.com。