

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.04.012

支持再制造升级的机械产品绿色模块划分方法研究*

康博凯¹, 张秀芬^{1,2,3*}, 张国兴¹

(1. 内蒙古工业大学 机械工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 3. 康力电梯股份有限公司, 江苏 苏州 215213)

摘要:针对产品过时或淘汰造成的资源无法有效回收利用问题,对机械产品再制造升级的性能需求进行了研究,提出了一种基于设计结构矩阵的产品绿色模块划分方法。定义了产品零部件之间的功能、结构、回收模式等再制造升级的绿色属性;根据层次分析法计算得出了各属性的所占权重,在此基础上建立了产品零件的综合关联度矩阵;根据产品的设计需求、经济性和环境属性等要求,基于全链接层次聚类法进行了模块聚类,得到了机械产品可再制造升级模块划分方案;最后,以永磁同步曳引机为研究对象,对所提方法的可行性进行了验证。研究结果表明:该方法能有效地对机械产品进行可再制造升级模块划分,模块内部零件之间的联系紧密,且具有很高的装配性,模块之间又有很高的独立性,易于机械产品的再制造升级。

关键词:再制造升级;设计结构矩阵;产品绿色模块划分;全链接层次聚类法

中图分类号:TH122;TB472

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2021)04-0474-05

Mechanical product green module partition method for remanufacturing upgrade

KANG Bo-kai¹, ZHANG Xiu-fen^{1,2,3}, ZHANG Guo-xing¹

(1. College of Mechanical Engineer, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
3. Canny Elevator Company Limited, Suzhou 215213, China)

Abstract: Aiming at the problem that the resources could not be recycled effectively because of the products being out-of-date or getting phased out, the requirements of the remanufacturing and upgrading performance of mechanical products were studied, a method of product green module partition based on design structure matrix was proposed. The green properties of remanufacturing upgrade, such as function, structure, recycling mode and so on, were defined for the product parts. And the weight of each attribute was obtained according to the analytic hierarchy process (AHP), on which basis the comprehensive correlation matrix of product parts was established. According to the requirements of product design, economy and environment, the whole link hierarchical clustering method was used to cluster the modules, and a remanufacturing and upgrading module partition scheme of mechanical products was obtained. The feasibility of the proposed method was verified by taking the permanent magnet synchronous traction machine as the research object. The results indicate that this method can effectively divide the remanufacturing and upgrading modules of mechanical products. The internal parts of the modules are closely connected and have a high degree of assembly. And the modules are highly independent and they are easy to remanufacture and upgrade mechanical products.

Key words: remanufacturing upgrade; design structure matrix; product green module partition; whole link hierarchical clustering method

0 引言

再制造升级,指以产品全寿命周期为指导,以实现

废旧产品性能提升为指标,以优质、高效、节能、环保为准则,以先进技术和产业化生产为手段,修复、改进废旧产品的一项技术措施。模块化设计是提高产品再制

收稿日期:2020-05-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51965049,51565044)

作者简介:康博凯(1997-),男,山西临汾人,硕士研究生,主要从事机械设计和再制造方面的研究。E-mail:940599257@qq.com

通信联系人:张秀芬,女,教授,硕士生导师。E-mail:xxff_6188@163.com

造升级性的途径之一^[1,2]。

模块划分是模块化设计的关键技术,将产品划分为不同模块,构建模块化平台,通过不同模块组合,形成具有不同功能的产品实例。模块划分一直是国内外研究的热点。

薄振一^[3]提出了考虑模块耦合的模块划分方案,通过物理、环境和成本,分析零件间的关联度,使用复杂比例评价方法对模块划分方案进行了评价;程贤福^[4]通过设计结构矩阵表达零部件的关联关系,利用FCM算法对零部件进行了聚类,以模块内聚度和模块间耦合度为目标,建立了模块度准则,从而得到了合理的模块划分方案;苏梅月^[5]提出了基于质量屋的再制造产品模块划分方法,根据产品各个模块的重要度,运用价值工程理论分析了各个方案中模块的价值,实现了各模块的遗传进化,完成了再制造产品的模块化组合设计。

在绿色模块划分方面,魏巍^[6]提出了基于环境因子的产品平台模块划分方法,将绿色理念贯穿产品全生命周期中,通过引入环境因子和零部件关联矩阵建立了目标函数,并提出了一种改进的免疫克隆多目标优化算法进行问题求解。唐涛^[7]提出了绿色模块化设计方法,采用零件合并准则对零件进行合并,接着用绿色准则和功能准则对模块进行划分;邓体立^[8]提出了基于客户需求的产品绿色模块划分方法,通过综合考虑产品零部件之间的基本属性和绿色属性,建立了产品的综合矩阵,以模块度为适应度函数,运用遗传算法计算出了最佳的绿色模块划分结果;JI Y^[9]提出了一种面向产品生命周期的有效性驱动的模块化设计方法;YU S^[10]通过考虑功能以及与产品生命周期相关的属性,建立了模块适应性聚类函数,采用成组遗传算法进行了模块划分。

在再制造模块划分方面,刘涛^[11]结合产品生命周期各阶段特性,制订模块划分准则,通过模块间关联度最优化进行了模块划分;CHENG Q^[12]基于原子理论实现模块的划分,分析了重型机床再制造域和结构域中设计参数的相似性;侯昆峰^[13]对模块进行相似性和独立性分析以辨别可再设计零件,采用模糊综合评价法和模糊优劣解距离法对原产品与再设计产品进行了综合评价;陈小斌^[14]分析了机电产品模块划分过程中绿色属性及功能结构与环境要素间的关系,建立了以组件集合、组件属性以及结构为要素的绿色模块化信息模型以及绿色模块划分双优化目标;基于遗传算法,实现了绿色模块划分。

目前,这些方法从产品结构、功能、环保及再制造

等几个属性进行产品模块划分。然而,随着技术更新周期、顾客需求的快速变化,市场上的这些产品很快过时或被淘汰,造成了资源浪费。再制造升级通过升级将技术革新融入再制造产品以便于产品回收再利用,快速应对市场变化,可以缓解上述问题。

目前,尚无面向再制造升级的模块划分方法。为此,本文提出一种支持再制造升级的机械产品绿色模块划分方法。

1 再制造升级绿色属性的定义

产品的可再制造升级性是其功能参数变化、可重用组件、模块化结构的集成反映,与产品回收模式、结构、功能等有关。为了使产品满足客户需求的同时具有可再制造升级性,定义了功能、结构、回收模式等再制造升级属性,并采用设计结构矩阵(design structure matrix, DSM)量化描述产品零部件之间的关联、关系。

1.1 功能属性

再制造升级过程中,会有新功能的嵌入或技术性的提升。产品进行模块划分时首先要满足模块的功能性,不同的组件在产品中具有不同的功能,实现相同功能或者相似功能的组件应该分在同一模块,从而保证功能独立性。如果具有高度功能相似性的组件在不同模块内,会造成模块的独立性下降。功能属性是指零件所要执行的服务产品系统性能的一系列能量传输和操作行为,主要表现为零件之间的能量流、信息流、作用力流和物质流的转换和传输^[15]。

功能属性关联度定义如表1所示。

表1 功能属性关联度定义

关联度	关系
1.0	成对使用缺一不可
0.8	存在能量联系
0.6	存在信息联系
0.4	存在作用力联系
0.2	两组件间物质信息联系
0	毫无功能相关

根据表1,通过专家打分法确定两零件之间功能关联度数值,设 n 为产品中零件的个数,则零件 i 和 j 的功能关联度矩阵为:

$$F = (f_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

式中: f_{ij} —零件 i 和 j 的功能属性关联度大小。

1.2 结构属性

产品的再制造升级要在整个模块中进行,合理的结构能够增强产品的升级换代能力。产品功能由物理结构实现,结构属性即结构连接关系,包括接触方式、

连接类型、工具类型和连接自由度 4 种类型,此处主要考虑接触方式和连接类型。接触方式是指两个组件的接触区域和接触点。如果两个组件接触点或者接触区域越大,那么两个组件的接触强度越大。连接类型取决于组件连接的紧密度,有放置、插入、旋入、紧密配合和不可拆卸等连接类型。工具类型指工具操作难度,有特殊工具、小型工具、大型工具和手工等。工具类型操作难度越大,则两个组件之间越难结合。连接自由度是指能够实现两个组件结合的自由度,结合自由度越大,则两个组件越容易结合。

结构属性关联度定义如表 2 所示。

表 2 结构属性关联度定义

关联度	关系
1.0	永久连接不可拆分
0.8	多面接触不易拆分
0.6	单面接触不易拆分
0.4	单点接触不易拆分
0.2	单点接触容易拆分
0	没有连接

根据表 2,通过专家打分法确定两零件之间结构关联度数值,则零件 i 和 j 的结构关联度矩阵为:

$$S = (s_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

式中: s_{ij} —零件 i 与 j 的结构属性关联度大小。

1.3 回收模式属性

回收阶段对环境的影响最大,产品退役后的回收模式包括回收重用、再制造重用、材料回收和焚烧或废弃。回收重用和再制造重用的零部件需要进行再制造修复或再制造升级,材料回收和焚烧或废弃处理的零部件需要应用新产品替换。为了便于再制造升级,将具有相似回收方式的组件归为同一模块,可提高回收效率,降低回收成本,减少在回收阶段造成的环境影响。

回收模式属性关联度定义如表 3 所示。

表 3 回收模式属性关联度定义

回收模式	关联度	权重	关系
回收重用 G_1	1	0.25	相同
	0		不同
再制造重用 G_2	1	0.25	相同
	0		不同
材料回收 G_3	1	0.25	相同
	0		不同
焚烧或废弃 G_4	1	0.25	相同
	0		不同

根据表 3,确定两零件之间在各回收模式下的关联度数值,分别得到零件 i 与 j 的关于各回收模式的关联度矩阵:

$$G_m = (g_{mij})_{n \times n} \quad (3)$$

式中: $m = 1, 2, 3, 4$; g_{mij} —两零件之间在各回收模式下的关联度大小。

根据式(3)则可得到关于回收模式的关联度矩阵,记为:

$$G = (g_{ij})_{n \times n} = \sum_{m=1}^4 0.25 G_m \quad (4)$$

式中: g_{ij} —零件 i 和 j 总回收模式属性关联度大小。

2 基于全链接层次聚类的模块划分

以上各个属性特征的权重会直接影响产品模块划分结果,分配的权重越高,说明对产品模块划分影响越大。

根据层次分析法^[16]进行各属性的重要性比较,标度为 1 ~ 9,计算得到各个属性权重分别为 $\omega_f = 0.32$, $\omega_s = 0.26$, $\omega_g = 0.42$,一致性检验 $CI = 0.052$,小于 0.058,因此满足一致性检验。

将上述构建的单一属性矩阵综合成一个总矩阵:

$$M = (m_{ij})_{n \times n} \quad (5)$$

式中: m_{ij} —零件 i 与 j 的综合相关性。

m_{ij} 的具体算式为:

$$m_{ij} = \omega_f f_{ij} + \omega_s s_{ij} + \omega_g g_{ij} \quad (6)$$

式中: ω_f —功能属性所占影响权重; ω_s —结构属性所占影响权重; ω_g —回收模式属性所占影响权重。

笔者在由式(6)得到的产品综合相关矩阵的基础上,应用全链接层次聚类法对其进行模块划分,具体过程如下:

步骤 1:定义两个聚类之间的数值 m_{ij} 为两个对象之间的最大距离。对于任意 m_{ij} ,其中 $i \neq j$,都把它当作一个聚类;

步骤 2:检索上述聚类中距离最远的两个聚类,把它们凝聚成新的聚类;

步骤 3:采用最长距离法重新计算新聚类与其他聚类之间的距离;

步骤 4:取适当的 λ 值,当所有聚类之间的距离小于 λ 时,转下步,否则,重复上述步骤 2 和 3;

步骤 5:输出最终模块聚类结果。

λ 越小,划分的模块数目越少。因此,需要根据产品的设计需求并考虑经济性和环境属性取适当的 λ 值,当 λ 取 0 或 1 时,没有划分意义。

3 实验及结果分析

为验证所提方法的可行性,本文以电梯曳引机为

例进行分析。

永磁同步曳引机爆炸图如图1所示。

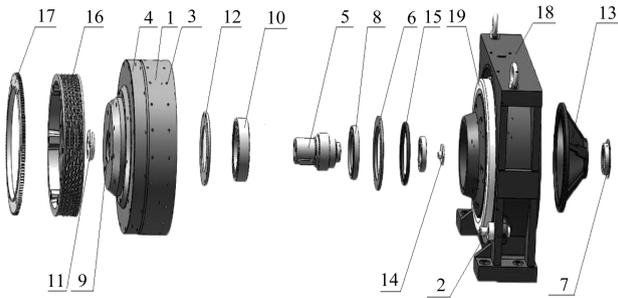


图1 永磁同步曳引机爆炸图

永磁同步曳引机产品零部件信息如表4所示。

表4 产品零部件信息

编号	名称	材料	回收模式
1	轮辐	Q235	材料回收
2	制动器固定栓	低碳钢	材料回收
3	永磁体	硬磁体	焚烧或废弃
4	轮毂	铝合金	材料回收
5	转轴	45 钢	再制造升级
6	压板	碳钢	回收重用
7	前端外压盖	HT250	回收重用
8	轴承压圈	GCr15 钢	材料回收
9	直通式压注油杯	铜	回收重用
10	轴承	铜合金	回收重用
11	后端外压盖	HT250	回收重用
12	内压盖	HT250	回收重用
13	端盖	HT250	材料回收
14	编码器安装板	铝	再制造升级
15	唇形密封圈	橡胶材料	焚烧或废弃
16	曳引机轮	QT60-2 球墨铸铁	再制造升级
17	驱动齿轮	40Cr	材料回收
18	基座	HT250	材料回收
19	定子铁芯	磁体	焚烧或废弃

笔者通过表(1~3)对曳引机进行分析,根据式(1~4)分别得出零件关于结构、功能、回收模式的绿色关系矩阵;最后,再通过式(5,6)得到零件的综合关联矩阵 M :

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0.384 & 0.22 & \dots & \dots & 0.56 & 0.391 & 0.22 \\ & 1 & 0.26 & \dots & \dots & 0.392 & 0.56 & 0.28 \\ & & 1 & \dots & \dots & 0.28 & 0.28 & 0.62 \\ & & & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & & 1 & 0.391 & 0.26 \\ & & & & & & 1 & 0.284 \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

将上述得到的零件综合关联度矩阵 M 采用全链接层次聚类法进行分析。由 M 可知,编号7与12的距离最大,为0.72;将7与12聚类,用最远距离法重新计算{7,12}与其他编号之间的距离。

第一次聚类结果如表5所示。

表5 第一次聚类结果

模块号	距离						
	模块 1-N	模块 2-N	...	模块 {7,12}-N	...	模块 18-N	模块 19-N
1	1	0.384	...	0.34	...	0.391	0.22
2		1	...	0.36	...	0.56	0.28
...		
{7,12}				1	...	0.326	0.24
...				
18						1	0.284
19							1

由表5可知,编号13与18距离最大,为0.7。

将13与18聚类,用最远距离法重新计算{13,18}与其他编号之间的距离,第二次聚类结果如表6所示。

表6 第二次聚类结果

模块号	距离						
	模块 1-N	模块 2-N	...	模块 {7,12}-N	...	模块 {13,18}-N	模块 19-N
1	1	0.384	...	0.34	...	0.391	0.22
2		1	...	0.36	...	0.56	0.28
...		
{7,12}				1	...	0.34	0.24
...				
{13,18}						1	0.284
19							1

重复以上步骤,得到曳引机零件聚类树图,如图2所示。

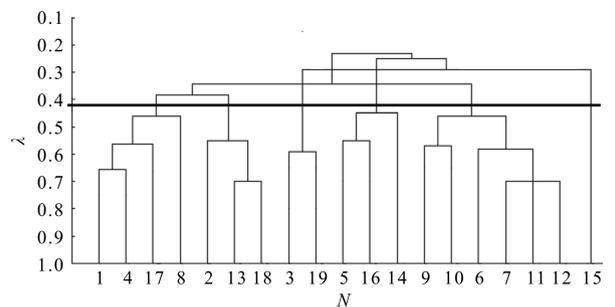


图2 曳引机零件聚类树图

根据模块划分粒度要求可以取不同的阈值,此处假设阈值 $\lambda = 0.42$,据此可以得到模块聚类的结果,如表7所示。

表 7 模块划分的结果

模块	零部件	回收模式
<a>	[1,4,8,17]	材料回收
	[5,14,16]	再制造升级
<c>	[6,7,9,10,11,12]	回收重用
<d>	[3,19]	废弃
<e>	[15]	废弃
<f>	[2,13,18]	材料回收

根据上述方法,可以将曳引机划分为 6 个模块,其中,模块 <a>, <f> 可进行材料回收;模块 可进行再制造升级。同时,各模块之间拥有很高的独立性,模块内部联系紧密的同时又具有高度的装配连接性,产品方便拆卸与维修,易于再制造升级,也能方便满足用户的需求。

4 结束语

本文从再制造升级性绿色角度建立模块划分模型,为了便于对废旧产品进行修复和改进,定义了功能、结构、回收模式等再制造升级绿色属性,分析了零件之间的关系,用设计结构矩阵来量化表示,提出了一种基于结构矩阵的产品绿色模块划分方法;通过对曳引机的模块划分方案的分析可知,该方法可有效地选择出模块划分方案,对制造企业开展绿色再制造具有一定参考价值。

该方法有以下特点:(1)从多方面分析了各零件间的关联关系,并建立了零件关联度矩阵;(2)模块之间拥有很高的独立性,模块内部联系紧密的同时又具有高度的装配连接性,产品方便拆卸与维修,易于再制造升级,也能方便满足用户的需求。

参考文献 (References):

- [1] 姚巨坤,朱 胜,崔培枝,等. 面向多寿命周期的全域再制造升级系统[J]. 中国表面工程,2015,28(5):129-135.
- [2] AZIZ N A, RAMLI R, AZHARI C H. Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: a critical review [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2016(112):282-290.
- [3] 薄振一,耿秀丽,何建佳. 面向绿色再制造的产品模块划

分方案评价方法[J]. 资源开发与市场,2019,35(10):1225-1230.

- [4] 程贤福,罗珺怡. 考虑两两模块之间关联关系的产品模块划分方法[J]. 机械设计,2019,36(4):72-76.
- [5] 苏梅月,周 敏. 面向再制造的产品模块化设计方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(1):60-63.
- [6] 魏 巍,许少鹏,梁 赫. 基于环境资源因子的产品平台模块划分方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2016,28(2):335-344.
- [7] 唐 涛,刘志峰,刘光复,等. 绿色模块化设计方法研究[J]. 机械工程学报,2003(11):149-154.
- [8] 邓体立,容芷君,曹云飞. 基于客户需求的产品绿色模块划分方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(11):141-144,149.
- [9] JI Y, JIAO R J, CHEN L, et al. Green modular design for material efficiency: a leader-follower joint optimization model [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2013(41):187-201.
- [10] YU S, YANG Q, TAO J, et al. Product modular design incorporating life cycle issues-Group Genetic Algorithm (GGA) based method[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2011,19(9):1016-1032.
- [11] 刘 涛,刘光复,宋守许,等. 面向主动再制造的产品模块化设计方法[J]. 中国机械工程,2012,23(10):1180-1187.
- [12] CHENG Q, GUO Y, LIU Z, et al. A new modularization method of heavy-duty machine tool for green remanufacturing[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 2018,232(23):4237-4254.
- [13] 侯昆峰,李中凯. 面向绿色模块化的产品重设计方法[J]. 现代制造工程,2017(12):139-145.
- [14] 陈小斌. 机电产品绿色模块划分方法研究与应用[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2012.
- [15] 吕 健,王 震,潘伟杰,等. 基于层次聚类的定制产品模块划分方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2019(11):134-138.
- [16] 闻邦椿. 机械设计手册:第 6 卷现代设计理论与方法[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2004.

[编辑:雷 敏]

本文引用格式:

康博凯,张秀芬,张国兴. 支持再制造升级的机械产品绿色模块划分方法研究[J]. 机电工程,2021,38(4):474-478.

KANG Bo-kai, ZHANG Xiu-fen, ZHANG Guo-xing. Mechanical product green module partition method for remanufacturing upgrade[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2021,38(4):474-478.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>