

再制造设计的创新理论与方法^{*}

姚巨坤, 朱 胜, 时小军, 王小明

(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

摘 要: 再制造设计是提升再制造效益的重要方法途径, 是对产品设计和工程设计的创新补充, 属于新兴的设计内容。以再制造设计概念与特征分析为基础, 提出了面向再制造创新设计的产品梯度寿命设计理论、再制造性设计与评价理论、产品再制造工程设计理论, 研究分析了面向再制造的产品材料设计、产品结构设计、再制造产品生产设计等再制造设计的新内容, 为再制造设计的理论研究和应用提供了借鉴。

关键词: 再制造; 再制造设计; 设计理论与方法; 梯度寿命

中图分类号: TH16

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2014)02-0001-05

New Theory and Methods of Remanufacturing Design

YAO Ju-kun, ZHU Sheng, SHI Xiao-jun, WANG Xiao-ming

(Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Remanufacturing design is an important measure for improving the remanufacturing benefit, and is a new complementarity for product design and engineering design, which belongs to the rising design content. Based on the analysis of remanufacturing design conception and characteristic, the theories of supporting remanufacturing innovative design that include the product grade life design theory, and product remanufacturability design and assessment theory, and product remanufacturing engineering design theory were put forward, and the innovative remanufacturing design methods on product material, structure and production of remanufacturing were analyzed, which provided a reference for remanufacturing design theory research and method application.

Key words: remanufacturing; remanufacturing design; design theory and method; grade life

0 引 言

在 2014 年 1 月由中国工程院主办的“2014 中国创新设计发展战略专题研讨会”上, 全国人大常委会原副委员长路甬祥院士在报告中提出, 创新设计将促进引领“中国制造”向“中国创造”的历史跨越, 并将设计分别表征为传统设计、现代设计和创新设计, 指出创新设计在第三次工业革命浪潮中, 必然会引领以网络化、智能化和绿色低碳可持续发展为特征的文明走向^[1]。

再制造是以废旧产品作为生产毛坯, 通过专

业化恢复或升级改造的方法来使其质量特性不低于原有新品水平的制造过程^[2]。再制造设计是实现废旧产品最优化再制造的重要内容, 属于创新设计的重要内容, 对于提升再制造的智能化生产和绿色低碳可持续发展具有重要作用。随着产品设计理论和再制造生产技术与模式的发展, 再制造设计在理论与方法方面都有所创新发展, 文中探讨提出了再制造设计理论和方法的一些新观点, 对于开拓再制造设计理论研究和实践应用具有一定的参考作用。

收稿日期: 2013-12-20; 修回日期: 2014-03-07; 基金项目: * 国家自然科学基金(51205408); 全军军事科学研究计划(13QJJ003-041)

作者简介: 姚巨坤(1974—), 男(汉), 河南卫辉人, 副教授, 博士; 研究方向: 再制造设计

网络出版日期: 2014-03-18 16:40; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140318.1640.006.html>

引文格式: 姚巨坤, 朱胜, 时小军, 等. 再制造设计的创新理论与方法 [J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 1-5.

1 再制造设计的概念与特征

1.1 再制造设计

再制造设计是指根据再制造要求,通过运用设计方法和先进技术,对产品再制造性及再制造生产过程中的所有生产环节、技术单元和资源利用进行全面规划设计,最终形成最优化再制造方案的过程^[2]。再制造设计主要研究产品设计阶段的再制造性设计与验证评价;研究再制造系统(包括技术、设备、人员)的功能、组成、建立及其运行规律的设计优化方法等。其主要目的是应用全系统全寿命过程的观点,采用现代科学技术的方法和手段,设计装备具有良好的再制造性,并优化再制造保障的总体设计、宏观管理及工程应用,促进再制造各保障系统之间达到最佳匹配与协调,以实现及时、高效、经济和环保的再制造生产^[3]。

1.2 再制造设计的特征

再制造设计面向产品寿命周期的全系统工程,开展产品的再制造属性和工程系统设计,具有以下鲜明的特征:①再制造设计是实现产品再

制造能力提升的一种有效方式,追求获得再制造效益最大化;②再制造设计在产品设计和再制造工程中具有对象的系统性和可操作性;③再制造工程设计具有毛坯性能的个体性和毛坯数量、质量的不确定性等特点;④再制造设计具有产品再制造性能的认知性和再制造目标的多样性;⑤再制造设计具有面向资源、环境的再制造工程需求性和产品性能可持续发展的规律性。

2 产品再制造设计理论创新的内容及方法体系

产品再制造设计是对产品的重新设计过程,包括对产品功能性能的属性设计和生产过程的工程设计,其也存在着许多面向再制造特色显明的设计理论和实现方法,图 1 所示为面向再制造的创新设计理论(包括梯度寿命设计理论、再制造性设计与评价理论、再制造工程设计理论)与方法(包括面向再制造的材料设计、结构设计和生产设计等方法),其各具有一定的支撑方法来实现再制造的创新设计。

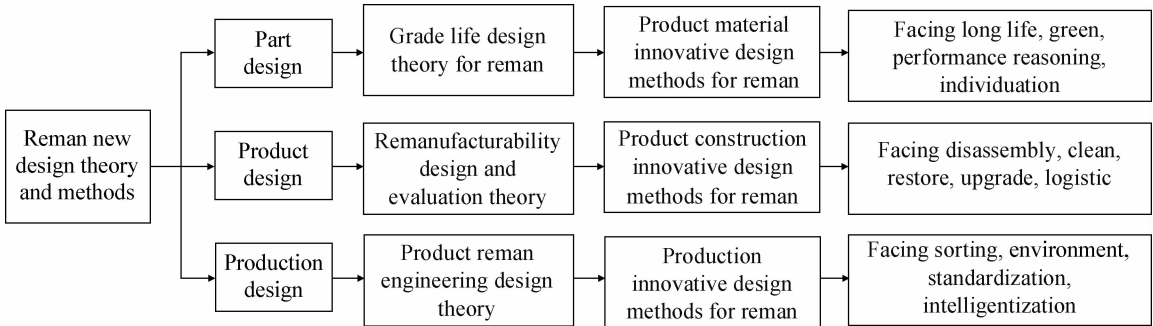


图 1 面向再制造的创新设计理论与方法

Fig. 1 New theory and methods of remanufacturing design

3 产品再制造设计的理论创新

再制造在产品寿命周期中的应用,对产品的自身发展模式和内容带来了深刻的变化和影响,一是改变了传统的产品单寿命周期服役模式,二是新增加了产品设计阶段的再制造属性的设计,三是再制造生产过程是一个全新的过程,3 者都需要通过再制造设计的理论创新来进行系统考虑。

3.1 面向再制造的梯度寿命设计理论

传统的产品属于单寿命周期的产品使用,通过再制造,可以实现产品整体的多寿命服役周期

使用。基于再制造的产品多寿命周期使用是一种全新的产品服役模式,相对于传统的单寿命周期服役模式,存在着许多不同的设计要求,其最核心的是面向再制造实现零件的梯度寿命设计。面向再制造的梯度寿命设计理论是以产品服役条件及服役寿命为基础,采用寿命梯度基准来量化设计零部件的使用寿命,使低价值的、再制造中需要更换的零件寿命等于产品的单次使用寿命,而高价值的、需要重新利用的零部件寿命则根据工况及性能满足要求设计为产品单次寿命的不同梯度倍数,这样可以优化形成最佳再制造

方案,即在产品的第 N 次再制造中只要替换一次寿命和达到 N 倍寿命的零部件,使该产品在再制造过程中减少对零部件的剩余寿命评估和损伤件的恢复工艺过程,简化再制造生产过程,并保证再制造质量并提升再制造效益。产品梯度寿命设计交叉融合了先进设计理论、材料力学、工

程材料、应用数学、计算机软硬件技术、测试技术等多学科的前沿应用理论的综合技术,其技术方法包括可靠性设计分析、失效分析、疲劳寿命评估等,具有交叉性、复杂性、创新性,需要进行深入的研究与分析。产品零部件梯度寿命设计步骤如图 2 所示。

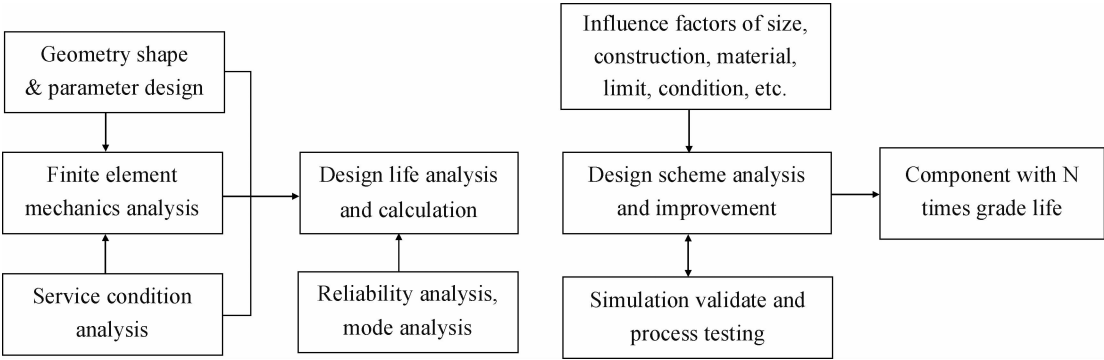


图 2 零件梯度寿命设计步骤

Fig. 2 Design proceduce of components grade life

3.2 产品再制造性设计与评价理论

传统的产品设计主要考虑产品的可靠性、维修性、测试性等设计属性,而为了提高产品末端易于再制造的能力,需要综合设计产品的再制造性,即在产品阶段就需要面向再制造的全过程进行产品结构等属性设计,并及时对设计指标进行评价和验证,提升产品的再制造能力和再制造效率。因此,需要基于产品属性设计的相关理论与方法,论证提出再制造性指标体系,建立新产品设计时其再制造性设计与评价理论,形成提升新产品再制造性的设计准则、流程步骤与应用方法。

3.3 产品再制造工程设计理论

传统产品的寿命周期包括“设计—制造—使用—报废”,是一个开环的服役过程,而再制造实现了废旧产品整体的再利用,是传统产品寿命周期中未有的全新内容,需要对其生产工程过程进行系统考虑。废旧产品再制造工程过程包括废旧产品的回收、再制造产品的生产和销售使用 3 个阶段,是一项系统工程,需要采用工程设计的理论方法,综合设计优化废旧产品的逆向物流、生产系统、产品销售及售后服务模式等,形成最佳的再制造生产保障资源配置方案和生产模式^[4]。因此,需要从产品再制造的全系统工程角度进行考虑,综合采用工程设计相关理论与方

法,建立面向产品再制造的工程设计理论,形成再制造工程优化设计的方法与步骤。

4 再制造设计的方法创新

4.1 面向再制造的产品材料设计方法

再制造要求能够实现产品的多寿命周期使用,而产品零部件材料在服役中保持性能稳定性是产品实现多寿命周期使用的基础。因此,产品材料的创新设计是面向再制造需要重点考虑的内容,包括 5 个方面。

4.1.1 面向再制造的材料长寿命设计

传统的产品材料设计以满足产品的单寿命使用要求为准则,而再制造要实现产品的多寿命周期,需要设计时根据产品的功能属性、零部件服役环境及失效形式,综合设计关键核心件的使用寿命,选用满足多寿命周期服役性能的材料,或者选用的零部件材料在单寿命周期服役失效后便于进行失效恢复。

4.1.2 面向再制造的绿色材料设计

再制造目标是实现资源的最大化利用和环境保护,要求在面向再制造进行材料设计时,需要综合考虑选用绿色材料,即在产品多寿命服役过程中或者在再制造过程中,尽量选用对环境无污染、易于资源化再利用或无害化环保处理的材料,促进产品与社会、资源、生态的协调发展。

4.1.3 面向再制造的材料反演设计

传统的产品材料设计是由材料性能决定产品功能的正向设计模式,而再制造加工主要是针对失效零件开展的修复工作,首先是根据产品服役性能要求进行材料失效分析,推演出应具有的材料组织结构和成分,其次是选用合适的加工工艺将失效部件修复的过程^[5]。通过由服役性能向组织结构、材料成份和再制造加工工艺的反演过程,可以通过再制造关键工艺过程中的材料选择,来改进原产品设计中的材料选择缺陷,实现产品零部件材料性能的改进和服役性能的提升。

4.1.4 面向再制造的材料智能化设计

针对产品服役全过程零部件的多模式损伤形式及其损伤时间的不确定性,可以采用材料的智能化设计技术。例如,在材料中通过添加微胶囊来自动感知零件运行过程中产生的微裂纹,并通过释放相应元素来实现裂纹的自愈合,从而实现零件损伤的原位智能不解体恢复,实现面向产品服役过程中的在线再制造。

4.1.5 面向再制造的材料个性化设计

产品服役过程中环境条件的变化决定了再制造产品及其零部件损伤的多样化,因此,对于相同的零件其不同的损伤及服役状况,对其材料需要进行个性化设计,减少产品末端时零部件的损伤率。例如,采用个性化的材料来避免不同服役环境下的零部件失效;通过个性化的再制造材料选用可以满足不同形式损伤件服役性能的个性化修复需求。

4.2 面向再制造的产品结构设计方法

产品再制造生产能力的提高依赖于其结构的诸多特有要求,满足其生产过程中的拆解、清洗、恢复、升级、物流等要求,重点包括 5 方面。

4.2.1 产品结构的易拆解性设计^[6]

废旧产品的拆解是产品再制造的首要步骤,通过设计产品的拆解性,可以实现产品的无损和自动化拆解,显著提高老旧产品零件的再利用率 and 生产效益。而产品的易拆解性与产品的结构密切相关,因此,在新产品设计时,尽量采用可实现无损拆解的产品结构,进行模块化和标准化设计,并在拆解时设计支撑和定位的结构,便于进行由产品→部件→组件→零件的拆解过程,实现产品易于拆解的能力。

4.2.2 产品结构的易清洗性设计

废旧零件清洗是再制造的重要步骤,也是决定再制造产品质量的重要因素,但通常设计的一些异型面或管路等复杂结构,会造成清洗难度大,费用高,清洁度低。因此,在产品设计时,需要进行易于清洗的产品结构和材料设计,要尽量减少不利于清洗的异型面,例如,减少不易于清洗的管状结构、复杂曲面结构等,有效保证再制造产品质量。

4.2.3 产品结构的易恢复性设计

产品零部件在服役过程中将可能存在着各种形式的损伤,其结构的损伤能否恢复,决定着产品的再制造率和再制造能力,因此在进行产品结构的设计时,需要预测其结构损伤失效模式,并不断改进结构形式,尽量避免产品零部件的结构性损伤,并在一旦形成损伤的情况下,能够提供便于恢复加工的定位支撑结构,实现零部件结构损伤的可恢复。

4.2.4 产品结构的易升级性设计

当前技术发展速度快,出现了越来越多因功能落后而退役的产品,实现功能退役的产品再制造需要采用再制造升级的方式,即在恢复性能的同时,通过结构改造增加新的功能模块。因此,在产品设计时,需要预测产品末端时的功能发展,采用易于改造的结构设计,便于末端时进行结构改造,嵌入新模块而提升性能^[7]。

4.2.5 产品结构的易运输性设计

产品再制造的前提是实现老旧产品的收集并便于运输到再制造生产地点,并在生产过程中能够方便地在各工位进行转换。因此,在产品结构设计时,要尽量减少产品体积,提供产品或零部件易于运输的支撑结构,避免在运输过程中有易于损坏的突出部位等。同时还要考虑产品零部件在再制造加工中各工位转换及储存时的运输性。

4.3 面向再制造的产品生产设计方法

再制造生产包括拆解、清洗、检测、分类、加工、装配、测试等诸多工艺过程,需要综合进行全生产工程要素考虑来提升再制造效益,主要包括 4 个方面。

4.3.1 再制造零部件分类设计

再制造分类是指对拆解后的废旧零件进行快速检测分类,先按照可直接利用、再制造利用、

废弃分类,再将同类的零件进行存放或处理,快速简易的再制造分类能够显著提升再制造生产效率。因此,在产品设计中,需要增加零件结构外形等易于辨识的特征或标识,例如,通过在产品零部件上设计永久性标识或条码,可以实现产品零部件材料类别、服役时间、规格要求等信息的全寿命监控,便于对零件快速分类和性能检测。

4.3.2 绿色化再制造生产设计

产品再制造过程应属于绿色制造过程,需要减少再制造过程中的环境影响和资源消耗。因此,在再制造生产过程中设计中,要尽量采用清洁能源和可再生材料,选用节能节材和环保的技术装备,优化应用高效绿色的再制造生产工艺,采用更加宜人的生产环境,使得再制造生产过程使用能源更少,产生污染更少,节约资源更多,促进再制造生产过程为绿色生产过程。

4.3.3 标准化再制造生产设计

再制造产品质量是再制造发展的核心,而保证再制造产品质量的管理基础是实现再制造生产的标准化。因此,通过完善建立再制造标准体系,设计实现再制造的标准化生产工艺流程,实现精益化的再制造生产过程,可以形成标准化的质量保证机制。

4.3.4 智能化再制造生产设计

当前制造业向着数字化网络化智能化方向发展,再制造属于先进制造的内容,因此,通过系统的再制造生产设计,在再制造过程中也需要不断推进数字化网络化技术设备应用,在再制造生产过程中采用更多的智能化、信息化、自动化生产和管理技术,设计实现智能化再制造生产,促进再制造效益的最大化。

5 结 论

(1) 再制造设计是提升再制造效益的重要手段,也是创新设计的重要内容,再制造的发展不断

推动着再制造设计理论与方法的创新发展,并对再制造工程提供着重要支撑。

(2) 再制造创新设计的理论包括面向再制造的梯度寿命设计理论、再制造性设计与评价理论、产品再制造工程设计理论,这些都是面向再制造发展而出现的新的设计要求和应当创新发展的理论,以促进绿色再制造工程的发展。

(3) 再制造设计理论的创新,不断推动着再制造设计具体方法的创新,需要重点开展面向再制造的产品材料设计、面向再制造的产品结构设计、面向再制造的产品生产设计等领域创新设计方法的研究和应用。

参考文献

- [1] 路甬祥. 创新设计将促进中国制造向中国创造跨越[EB/OL]. [2014-01-24]. <http://scitech.people.com.cn/n/2014/0124/c1007-24221177.html>.
- [2] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 138-158.
- [3] 朱胜, 姚巨坤. 装备再制造设计及其内容体系[J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 1-6.
- [4] Hatcher G D, Ijomah W L, Windmill J F C. Design for remanufacture: a literature review and future research needs[J]. Journal of Cleaner Production, 2011, 19(17/18): 2004-14.
- [5] 朱胜. 再制造技术创新发展的思考[J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 1-5.
- [6] Gray C, Charter M. Remanufacturing and product design[J]. International Journal of Product Development, 2007, 6(3/4): 375-392.
- [7] Matsuda A, Shimomura Y, Kondoh S, et al. Upgrade planning for upgradable product design[C]//Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2003. EcoDesign'03. 2003 3rd International Symposium on. IEEE, 2003: 231-234.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎21号院 100072
装甲兵工程学院装备维修与再制造工程系
Tel: (010)6671 8477
E-mail: yaojk@sohu.com

(责任编辑: 王文字)