

产品全生命周期 设计与评价

于随然 陶璟 著



科学出版社

产品全生命周期设计与评价

于随然 陶璟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了产品全生命周期设计(LCD)、全生命周期评价(LCA)和全生命周期仿真(LCS)的原理、方法、最新研究进展和应用实例。主要包括:产品全生命周期设计和评价产生的背景、基本概念和原理,产品全生命周期建模方法,面向全生命周期的模块化技术,LCA方法、LCA软件开发,产品全生命周期仿真,以及产品全生命周期设计与DFX等。本书的特点包括:①系统性,全面论述了LCD、LCA和LCS的原理、方法及应用,从基础知识到研究领域的最新成果,由浅入深、循序渐进;②创新性,结合了作者的最新研究成果,重点论述了绿色模块化设计方法和全生命周期仿真方法,是同类书籍中首次论述的主题;③实践性,有丰富的研究案例和应用实例;④学术拓展性,不是局限于LCA,而是以全生命周期思想为核心,介绍了多种相关绿色设计方法。

本书可作为产品全生命周期设计相关课程教材,也可供相关专业大学教师、研究人员、工程技术人员、研究生等阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

产品全生命周期设计与评价/于随然,陶璟著.—北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-032580-8

I. ①产… II. ①于…②陶… III. ①产品生命周期-产品设计②产品生命
周期-环境影响-评价 IV. ①F273.2②TB472③X820.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第213233号

责任编辑:范 勃 陈 婕 / 责任校对:包志虹
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:368 000

定价:60.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

虽然过去我们一直持有从自然界获取有用资源来改善生活质量,再把不需要的东西排放到大自然这样一种“资源无穷论”的观点,但随着现代工业社会的发展,我们已逐渐认识到:环境的可持续发展等重要概念应该受到重视。“从量的满足到质的满足”的转换被认为是实现可持续发展的重要思想,是设计发展的一个方向。因此,合理地设计和管理产品的生命周期能有效实现资源的合理利用、降低产品的环境负荷并能满足用户对服务质量的要求。

要从产品的环境调和性开发中获得利益,必须实现产品从计划、设计、制造、使用、维修到废弃的闭环化,形成闭环产品系统,其中设计已经演变为产品全生命周期设计。全生命周期设计(life cycle design, LCD)是为了实现功能属性、环境属性和经济属性的综合要求,对与产品全生命周期相关的信息逐渐详细化的决策过程。全生命周期评价(life cycle assessment, LCA)是对某一产品系统或服务从原材料获取直至最终废弃处理的整个生命周期的输入、输出进行编制及对其潜在环境影响进行评价的技术,其目的在于通过对产品生产与消费中可能伴随的环境影响进行量化和汇编,以对其更好的理解和说明,从而为改进设计提供建议和理论支持。但是,由于被评价对象在闭环化的全生命周期各个阶段含有多种选项、构成循环各环节主体相互独立的决策机制以及支配循环的要素中的不确定因素,需要运用全生命周期仿真(life cycle simulation, LCS)来描述循环型生命周期各环节的物体、资金等的流向,并在各环节的生命周期评价的基础上,从环境和经济方面来评价产品全生命周期的综合效果,因此,产品全生命周期设计、评价和仿真的集成是环境调和型产品设计的关键技术。

基于以上背景,作者结合他在产品全生命周期设计、评价和仿真的研究成果和长期从事高校教育的教学经验撰写了这本专著。全书共7章。第1章简要阐述了设计和全生命周期设计的概念、研究现状等。第2章较详细地论述了产品的模型化过程(指加工、组装、使用、拆解等操作)的模型化以及产品全生命周期模型化(过程之间的关系)。第3章论述了产品全生命周期模块化设计的一般方法,并通过案例对该设计方法予以说明,主要包括:产品全生命周期模块设计中驱动力的概念、权重分配和零件关系模型的建立;基于种群遗传算法的全生命周期模块化设计;案例研究及敏感度分析。第4章论述了全生命周期评价方法,并对家用电冰箱进行了全生命周期评价、参数化-模块化-模板化LCA方法及其应用。第5章阐述了面向家电产品的LCA软件开发的关键技术、系统开发实践。第6章详细论述了产品全生命周期仿真的概念、方法、过程建模和不确定性分析等,并通过两个案例

阐述了该方法如何应用。第 7 章重点论述三种 DfX 方法:面向可制造性的设计、面向装配和拆卸的设计以及面向回收的设计。

本书涉及的大部分研究成果是在国家自然科学基金(50775141)、国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA04Z123)等项目支持下完成的,在此对给予支持的相关单位表示感谢。同时,感谢研究生田夏、张建普、杨鸣和杨庆研等对本书做出的贡献。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

于随然

于上海交通大学机械与动力工程学院

2011 年 11 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	6
第 2 章 产品的全生命周期建模	9
2.1 产品的模型化	9
2.2 过程的模型化	11
2.2.1 产品开发	11
2.2.2 制造过程	13
2.2.3 物流	16
2.2.4 使用与维修	16
2.2.5 回收处理	18
2.3 全生命周期模型化	20
2.4 生命周期成本的计算模型	22
参考文献	25
第 3 章 产品全生命周期模块化设计	26
3.1 产品全生命周期模块化设计的基本概念	26
3.1.1 模块的定义及特性	26
3.1.2 产品全生命周期模块化设计的基本概念	27
3.1.3 产品全生命周期模块化设计的研究现状	28
3.2 模块化驱动力及产品中的零件关系模型	33
3.2.1 设计方法关联假设条件	33
3.2.2 全生命周期模块化设计驱动力	34
3.2.3 不同模块化设计驱动力下的零件关系模型	38
3.2.4 零件综合关系模型	45
3.2.5 零件之间的综合关系模型	46
3.2.6 综合矩阵的建立与特点	47
3.3 利用种群遗传算法对产品进行模块化设计	48
3.3.1 选取种群遗传算法作为模块优化算法的原因	48
3.3.2 初始模块数	50
3.3.3 利用种群遗传算法进行模块化重组	51
3.3.4 优化过程	53

3.3.5 优化方案的经济性和环境性能的评价	54
3.4 案例分析	57
3.4.1 家用电冰箱	57
3.4.2 建立各驱动力的零件关系矩阵与综合关系矩阵	61
3.4.3 种群算法设计过程	68
3.4.4 优化结果与原结构的比较	70
3.4.5 敏感度分析	75
参考文献	77
第4章 产品全生命周期评价	80
4.1 全生命周期评价简介	80
4.1.1 目标和范围设定	80
4.1.2 清单分析	81
4.1.3 影响评价	82
4.1.4 解释	83
4.2 家用电冰箱全生命周期环境影响评价	83
4.2.1 家电产品 LCA 研究现状	83
4.2.2 评价的目的和边界设定	88
4.2.3 数据收集与清单分析	90
4.2.4 清单分析结果	103
4.2.5 环境影响评价	108
4.2.6 解释	115
4.3 参数化-模块化-模板化 LCA	124
4.3.1 参数化 LCA 方法	126
4.3.2 模块化 LCA 方法	133
4.3.3 模板化 LCA 方法	138
4.4 参数化-模块化-模板化 LCA 的应用案例	141
4.4.1 案例一:家用电冰箱生产阶段的环境影响评价	141
4.4.2 案例二:咖啡壶生产阶段环境影响评价	151
参考文献	160
第5章 LCA 软件开发	164
5.1 现有 LCA 软件综述	164
5.1.1 LCA 软件开发的相关研究	164
5.1.2 现有商业 LCA 软件介绍	165
5.1.3 现有 LCA 软件的总结	174
5.2 MPT-LCA 开发关键技术	177
5.2.1 MPT-LCA 数据库设计	177

5.2.2	MPT-LCA 的清单分析算法	185
5.2.3	MPT-LCA 环境影响评价模型及算法	191
5.3	MPT-LCA 系统开发	197
5.3.1	MPT-LCA 系统总体设计	198
5.3.2	MPT-LCA 产品评价模板的建立	201
5.3.3	软件其他部分的开发	204
5.3.4	软件的主要应用	206
	参考文献	206
第 6 章	全生命周期仿真	208
6.1	产品全生命周期仿真的概念和过程框架	208
6.2	一般产品系统的生命周期过程模型	213
6.3	基于蒙特卡洛仿真的生命周期评价不确定分析方法	216
6.4	实例 1——家用冰箱“3R”措施的资源 and 能源节约评价	218
6.4.1	研究目标和范围	219
6.4.2	家用冰箱生命周期仿真模型	220
6.4.3	仿真场景	225
6.4.4	仿真结果及讨论	227
6.4.5	结论	229
6.5	实例 2——我国燃料乙醇全生命周期能源、排放和经济性评价	230
6.5.1	研究目标和范围	230
6.5.2	生物质燃料乙醇/汽油混合燃料车辆的全生命周期过程	231
6.5.3	生物质燃料乙醇/汽油混合燃料车辆系统的环境和经济性评价指标	234
6.5.4	基于蒙特卡洛仿真的生物质燃料乙醇/汽油混合燃料车辆系统生命 周期评价模型	236
6.5.5	生物质燃料乙醇/汽油混合燃料车辆系统经济性、能效、排放评价结果	238
6.5.6	结论和建议	251
	参考文献	252
第 7 章	全生命周期设计与 DfX	254
7.1	面向 X 的设计	254
7.2	面向可制造性的设计	255
7.2.1	基于设计规则的方法	255
7.2.2	基于特征分析的面向可制造性设计的方法	257
7.3	面向装配和拆卸的设计	258
7.3.1	面向装配的设计	258
7.3.2	面向拆卸的设计	261
7.4	面向回收的设计	273

7.4.1 基本概念和设计原则	273
7.4.2 案例研究——面向家电塑料回收的设计	275
参考文献	283
附录 A 模块化优化运算程序	284
附录 B 清单数据补全	288

第1章 绪 论

设计是为了实现一定的要求将与产品相关的信息(构想、属性、状态、举动、功能、性能)逐渐详细化的决策和实现过程。其中,要求(requirements)是规定所设计的产品必须具有的属性、状态、功能等信息;规格(specifications)是描述产品所必需的属性、状态、功能等信息;属性(attributes)是指产品所具有几何的、物理的、化学的性质,用定量值表示;状态(status)是产品在某处、某时刻其属性所持有值的组合;举动(behavior)是产品的状态随时间变化的表现;功能(function)是人以特定意图主观地观察产品时认为产品所发挥的作用(效力)^[1]。

设计科学是通过对设计过程的建模来理解设计的学问。设计科学作为一门学问其具有的抽象性和一般性必不可少。所谓一般性是指对任何具体领域的设计都可以适用的性质;而抽象性是具体设计描述的抽象化(数学描述的导入等)。

设计研究的范围包括设计方法论、设计原理、设计方法和设计学^[1]。设计方法论是指一般的应用领域(不针对具体机械)中的某一具体目标的体系化设计方法,如各种各样的优化方法,Design for X^[2](DfX,指产品生命周期的制造、维修、装配和拆卸、再利用等)设计法、质量控制设计领域的田口方法^[3]、质量功能展开法^[4]以及德国流的设计方法论等都属于这一研究范畴^[5]。设计原理是设计决策时的指导方针。Suh的公理设计法^[6]和中沢的设计原理选集是设计原理的代表作;其他被广泛应用的设计原理有“简单的最优”(零部件越少越好、越轻越好等)等。具体对象的设计研究属于设计方法的研究。历史上,设计教科书就多以车床设计法、内燃机设计法等为主要内容,这些适用于具体对象的非常实用的设计方法不仅限于机械工程领域,对其他工程领域具体对象的设计法的研究也非常有借鉴意义。具体对象的设计方法记录了该对象的详细设计过程,通过数学和信息技术的抽象化手段可以做成提高设计效率的设计工具。但是这种尝试毕竟依赖于个别对象,在应用于其他对象时有先天的局限性,因此如何开发通用性更好的设计系统显得尤为重要。由此可见,设计学是从抽象性和一般性的视点来研究设计对象的。

上述设计理论和方法主要是基于从自然界获取有用资源来改善我们的生活质量这样一种“资源无穷论”的观点。但人们在现代工业社会的发展中已逐渐认识到,环境的可持续发展等重要概念应该受到重视,现代工业产品的生产活动及其规模的逐渐扩大是造成环境问题的重要因素。为根本地解决这些问题,一方面,需要重新评估和修正现在的生产体系,即从过去的“生产—使用—废弃”的传统工程转变为包括“使用—维修—再利用”逆向工程在内的新的生产体系,即循环型

生产体系;另一方面,激烈的市场竞争要求制造商用尽可能少的资源消耗,低成本、高质量和迅速地推出能满足用户服务(service)需求的产品。因此,合理地设计产品的全生命周期,并在产品的全生命周期中合理地管理它,能有效地实现资源的合理利用和满足用户对服务质量的要求。“以用户为主题的生产”是制造业的另一个转型目标。基于以上转换我们提出了全生命周期工学的理念:以从产品计划到废弃的全生命周期为对象,同时考虑经济性、技术性、市场性与环境性,以求达到全局优化目的。

研究表明,要从产品的环境调和性开发中获得利益,必须实现产品从计划、设计、制造、使用、维修到废弃的闭环化,形成闭环产品系统。其中,设计已经演变为产品全生命周期设计,即为了实现一定要求,对与产品全生命周期相关的信息逐渐详细化的决策过程。产品全生命周期设计尽管还没有被广泛应用于产品研发中,但作为一个连接社会需求、经济规模和资源环境问题的平台已经被普遍接受^[7]。这是因为产品的可维修性、可拆卸性和回收性直接影响产品在使用时的性能,全生命周期的成本以及我们的生存环境都是“可持续型”循环经济社会的具体体现。因此,在国家中长期科学和技术发展规划纲要中关于制造业主题的部分就明确提出了“开发面向产品全生命周期的创新设计方法和技术”^[8]。

国外关于全生命周期设计的研究与应用始于20世纪80年代初的面向装配与拆卸的设计。但是自90年代初起,全生命周期设计才初步地形成系统的概念和结论。其标志是,美国于1992年9月发表研究报告 *Green products by design: choices for a cleaner environment* ^[9]、1993年发表研究报告 *Life-Cycle Design guidance manual* ^[10];日本学术会议于2000年4月发表研究报告《产品全生命周期设计的基础学术问题》^[11];欧盟于2001年发表集成产品政策(Integrated Product Policy, IPP)绿皮书^[12]。自1985年起,美国自然科学基金会(NSF)在“Design Theory & Methodology Program”名义下开始了对工程设计研究的资助,其目的是弄清楚产品开发过程,以便开发出设计方法和工具,从而提高设计质量和效率、降低开发成本,赶超日本和欧洲。表1.1是对NSF20年中所有资助项目按领域、每5年一个周期进行统计的结果^[13]。

表 1.1 NSF 在工程设计研究的不同领域的资助变化情况(1985~2004 年) (单位:%)

研究领域 (research area)	1985~1990 年	1990~1995 年	1996~2000 年	2001~2004 年
设计过程(design process/cognition)	21.2	1.4	3.0	0
优化(optimization)	9.4	25.7	13.4	9.3
人工智能(AI/KBS)	22.4	8.1	6.0	0
决策(decision/utility, DBD)	1.2	5.4	23.9	32.6
计算机辅助设计(CAD/CAGD)	5.9	16.2	6.0	11.6

续表

研究领域 (research area)	1985~1990 年	1990~1995 年	1996~2000 年	2001~2004 年
运动学/机器人学(kinematics/robotics)	3.5	5.4	10.4	7.0
观念化(ideation)	5.9	1.4	1.5	2.3
面向环境的设计(DfE/EbDM)	0	5.4	7.5	11.6
虚拟现实(VR/visualization)	0	1.4	4.5	2.3
设计理论与方法(GD&T)	2.4	1.4	1.5	7.0
功能、行为建模(function,behavior modeling)	3.5	2.7	4.5	2.3
制造工艺设计(Mfg process design)	4.7	5.4	4.5	2.3
面向制造性设计(DfM/IPPd)	3.5	2.7	1.5	0
其他(others)	16.5	17.6	11.9	11.6

从表 1.1 可以看出,面向环境的设计(DfE)从“零”资助到资助率排名第二,这说明资源环境问题与设计的关系越来越被重视。

与全生命周期设计关系密切的另一个关键问题是全生命周期评价,它被用来评估设计方案的环境性能。全生命周期评价就是对某一产品系统全生命周期的输入、输出和潜在环境影响进行评价的过程。纵观我国,该设计不论在评价指标还是在评价方法的研究和实践方面都具有较大的先进性。为了综合评价产品、一个企业甚至一个国家的“可持续性”,提出了“地球生产性”(地球生产性=全社会的满足度÷对地球环境的总负荷)^[14]、Factor-10^[15]、环境效率^[16]等表达方式。但是在现在的技术条件下,用一般的而且可计测的形式来公式化地描述上述评价指标还较困难。随着谋求解决环境问题的研究活动的进行,研究者提出了各种具体的评价指标,其中最具标准化和实用化的是全生命周期评价。日本已经将产品全生命周期评价技术列为实现循环经济的基础技术之一^[17]。Rose 针对制造商需要对自己所生产产品的回收负责的要求,研究了在设计阶段如何以生命周期的观点评估回收的环境影响和经济性的问题^[18]等。在环境影响和成本评价方面引入了仿真的概念来处理全生命周期的动态不确定性问题。近年来,随着资源环境问题的日益突出,产品全生命周期中的资源、能源消耗量以及对环境的影响正逐渐被重视并纳入了研究的范围。Murayama 建立了用来评估包括再使用、再循环在内的全生命周期环境影响和利润的关系的仿真模型^[19]。田中将贵等认为用户会受市场产品的不同特点的影响来决定自己的购买和废弃行为,制造商也会响应消费者的需求决定向市场提供的产品的性能(价格、质量、环境性等)^[20],利用全生命周期仿真的方法对不同的生命周期形态下环境影响所造成的差异进行了评估。Kimura 着眼于如何保持产品使用阶段的性能,提出了劣化条件下的产品性能仿真评价方法。但该方法仍是概念性的,需在考虑了生命周期中出现的各种不确定因素后将其进一步细化和实用化^[21]。

欧盟在通过设计与回收改进产品的资源环境属性从而实现可持续发展方面作了很大努力。产品生产消耗资源,并在其全生命周期的各个阶段都会对环境产生影响。发表集成产品政策绿皮书^[12]的目的是使这种资源消耗和环境影响最小化,并寻求在最有效的时刻采取措施。为了贯彻这种理念,欧盟推出了一系列指令(directives),并要求各国在指令的指导下制订法律以保障生态设计思想的执行。防治电子电器废弃物排放的指令(WEEE指令)意在增强所有涉及电子电器设备生命周期的操作人员的环保意识,如生产者、销售商、消费者,特别是直接涉及电子电器设备报废处理人员。有害物质限用指令(RoHS指令)规定欧盟各成员国应保证投放欧盟市场的新电器和电子设备产品不含有铅、汞、镉、六价铬、多溴联苯(PBB)或多溴二苯醚(PBDE)六种物质及其类似物质(指其化合物等)。能耗产品(用能产品)生态设计指令(EuP指令)将全生命周期理念引入产品设计环节中,旨在从源头入手,在产品的设计、制造、使用、维护、回收、后期处理这一周期内,对能耗产品提出环保要求,全方位监控产品对环境的影响,减少对环境的破坏。类似的指令还包括 ELV 指令和 REACH 指令等。

全生命周期设计的理念已经渗透到小型产品如手机、大型产品如空中客车 A380 等的各类产品(系统)中。空中客车公司为提高竞争力将开发更高效、更环保飞机的理念贯彻于最新产品 A380 的研发中(图 1.1),并在设计阶段就考虑了全生命周期中的问题,从而实现载客更多、噪声更低、排放更少。运行时,平均每座功率所产生的二氧化碳不足 75g。飞机退役时,通过其研发的 PAMELA (process for advanced management of end-of-life aircraft) 380 系统使其材料回收率达到 85%^[22]。



图 1.1 空中客车 A380 的可循环设计(recyclable by design)

在我国制造业快速发展的同时,因资源过度消耗、环境严重污染而使可持续发展模式无法实现的现状已经引起我国及国际社会的强烈关注。因此,我国提出了建设环境友好型、资源节约型的可持续循环社会的发展目标。为实现这一目标,未来制造业不能再仅通过产品的设计生产来追求附加价值的利益最大化,还须要重视通过产品的环境调和性方面的开发带来的利益。产品的环境调和性主要体现

在:①经济和环境方面同时具有可行性;②在制造、使用、维修和废弃等过程中造成的环境负担更小;③较少的能耗和资源使用量(reduce),更易于再利用(reuse)和再循环(recycle)。

基于上述原因,绿色设计的研究在国内受到了研究者和政府管理部门越来越高的重视,国家自然科学基金委员会也逐渐加大了在该领域的资助力度并取得了丰硕的研究成果,如关于绿色设计和再制造理论与方法研究、家电产品回收理论与技术的研究、绿色制造系统的研究、产品全生命周期评估等。以产品全生命周期为目标的协同设计方法和基于蒙特卡洛法的全生命周期仿真越来越受到研究者的重视。面向产品回收再利用、再制造的技术也是研究的热点。

就全生命周期各个阶段的具体技术而言,我国的研究主要集中在机电产品回收及其资源化方面。徐滨士等集中研究了再制造的相关技术,包括纳米表面工程、纳米热喷涂、剩余寿命预测的理论与技术等^[23~25]。刘光复和刘志峰等对废旧家电产品的绿色模块化设计技术、线路板的分解技术等进行了系统的研究^[26~29]。刘红旗等对机电产品绿色包装问题进行了综合分析和研究,提出了建立绿色包装流通体系和改善包装技术的新方法^[30]。刘飞等就绿色制造的相关问题,如理论体系框架^[31]等进行了深入的研究。汪劲松和段广洪等就废旧印刷电路板再资源化技术达到了实际应用阶段。李方义和李剑锋等就机电产品绿色设计的关键技术进行了研究^[32]。除学术界之外,工业界也在绿色设计的实践上进行了尝试,如济南复强动力有限公司在汽车发动机的再制造方面;上海华东拆车有限公司在汽车整车的回收处理方面等。海尔集团在绿色产品设计上已经有了成功的例子,如某品牌电冰箱经改进设计后壁厚减半、同时节能50%。

下列研究在产品整体和以循环为中心的处理技术的绿色度评价和全生命周期评估方面作出了较大贡献。刘光复和刘志峰针对家电产品回收工艺流程决策评价的多阶段、多目标等特点,采用层次分类方法建立了以经济指标和环境指标为主要内容的回收工艺流程评价指标体系。刘飞、曹华军等就绿色制造过程环境影响评估方法^[33]等进行了深入的研究。汪劲松和段广洪等就产品全生命周期分析等进行了系统的研究^[34]。向东等引入绿色度的概念作为评价产品绿色特性的综合指标,提出了基于产品系统的产品绿色度生命周期评价方法,利用模糊聚类法成功地实现了评价基准的选取,利用公理性设计实现了产品绿色度的影响评价,是一种操作性较强的生命周期评价方法^[35]。刘红旗等探讨了产品绿色度的评价模型及评价方法,提出了评价的基准、准则、综合评价和决策方法,构造了绿色产品的评价体系^[36]。王成焘和于随然等对全生命周期评估方法做了详细的研究,提出了3E(environment, energy, economy)评估模型,并以燃料乙醇为例,对其经济性、能量消耗和环境影响进行了较详细的分析^[37]。此外,还有研究者提出了模糊层次分析、神经网络、基于AHP的评价等多种绿色度评价方法。

由以上综述可见,国内的研究目前大多集中于产品生命周期某一阶段(尤其是

废弃阶段)内具体技术的研究。但是,国内外关于全生命周期整体综合评估方面的研究正逐渐增多,这种现状为本书研究的展开奠定了良好的基础。如前所述,我们有必要从整体上将产品生命周期系统化,在对设计方案进行环境、经济性等方面综合评价的过程中实现全生命周期方案的优化设计,从而设计出具有“整体可持续性”的产品全生命周期方案。

虽然过去我们一直抱着从自然界获取有用资源来改善我们的生活质量,再把不需要的东西排放到大自然这样一种“资源无穷论”的观点,但是随着现代工业社会的发展,我们已逐渐认识到应重视环境的可持续发展等重要概念;“从量的满足到质的满足”的转换是实现可持续发展的重要思想,是设计发展的一个方向。因此,今后的设计在明确了技术条件的前提下,还要满足如舒适性、安全性、环境友好性等隐性的非技术条件。在此思想指导下,设计不能只停留于考虑单个产品的情况,而且要考虑产品之间关系、产品与人和环境之间的和谐关系,以此为出发点、以生活质量的提高为目标,实现广义的“设计”。全寿命周期设计就是在产品设计的初级阶段将与产品整个生命周期有关的信息(变量)逐步详细化的决策过程,其核心是全生命周期评估和全生命周期仿真。

参 考 文 献

- [1] 吉川弘之,富山哲男. 設計学-ものづくりの理論. 東京:大蔵省印刷局,2000.
- [2] Huang G Q. Design for X. London:Chapman & Hall,1996.
- [3] Ross P J. Taguchi Techniques for Quality Engineering. New York: McGraw-Hill,1996.
- [4] 大野正,小野道照,赤尾洋二. 品質展開法. 東京:日科技連,1990.
- [5] VDI-Gesellschaft. VDI-222 Konstruktion und Entwicklung. Dusseldorf:VDI-verlag, 1977.
- [6] Nam P S. 公理设计——发展与应用. 谢友柏等译. 北京:机械工业出版社,2004.
- [7] Altung L, Jorgensen J. The life cycle concept as a basis for sustainable industrial production. Annals of the CIRP,1993,42(1):163—167.
- [8] 国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年). 北京:中国法制出版社,2006.
- [9] Office of Technology Assessment. Green Products by Design: Choices for a Cleaner Environment, US Congress. Washington D C: US Government Printing Office, 1992.
- [10] Greg K, Dan M. Life-Cycle Design Guidance Manual: Environmental Requirements and the Product System. Washington D C: US Environmental Protection Agency, 1993.
- [11] 日本学術会議,設計工学専門委員会. 21世紀における人工物設計・生産のためのデザインビジョン提言,2003.
- [12] Brussels. Commission of the european communities, green paper on integrated product policy. 2001. <http://ec.europa.eu/environment/ipp/>[2011-12-12].
- [13] Jami J S, Susan F, Stephen L. ED2030: Strategic Plan for Engineering Design. Final Report, NSF Workshop on Engineering Design in Year 2030,2004.
- [14] 吉川弘之. テクノグローブ. 東京:工業調査会,1993.

- [15] Schmidt-Bleek F, The Factor 10 Institute. <http://www.factor10-institute.org/index.html> [2011-12-16].
- [16] Judith E M K, Arnold T. Product Innovation and Eco-Efficiency. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1998.
- [17] 梅田靖, 高田洋三, 近藤伸亮他. 環境調和型ビジネスの設計支援技術に向けて. 精密工学会誌, 2005, 71(10): 1214—1218.
- [18] Rose E P, McAloone T C, Evans S. Application of Computer Simulation to Economically Justify the Design of a Life-cycle Approach. Stevenage: IEE Conference Publication, 1995, 28—34.
- [19] Murayama T, Hatakenaka S, Narutaki N, et al. Life cycle profitability analysis and LCA by simulating material and money flows. IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001: 139—144.
- [20] 田中将貴, 小野里雅彦, 寺本孝司他. 消費者と生産者の行動選好を考慮したライフサイクルシミュレーション. 精密工学会誌, 2006, 172(2): 271—275.
- [21] Kimura F, Hata T, Suzuki H. Product quality evaluation based on behavior simulation of used products. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 119—122.
- [22] The PAMELA (Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft) Project. <http://www.airbus.com>, [2011-12-18].
- [23] 徐滨士, 刘世参, 王海斗. 二十一世纪的纳米表面工程. 机械制造与自动化, 2005, 34(3): 1—4.
- [24] 张伟, 徐滨士, 梁志杰等. 电刷镀含纳米粉复合镀层结构和磨损性能. 装甲兵工程学院学报, 2000, 14(3): 30—34.
- [25] Zhang G, Wang C, et al. Fatigue life prediction of crankshaft repaired by twin arc spraying. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(Suppl 2): 70—76.
- [26] 刘光复, 江吉彬, 朱华炳等. 家电产品的回收设计. 机械设计与研究, 2002, 18(4): 45—47.
- [27] 唐涛, 刘志峰, 刘光复等. 绿色模块化设计方法研究. 机械工程学报, 2003, 39(11): 149—154.
- [28] 施震, 刘光复, 林巨广等. 基于环境意识的电冰箱回收性能评价系统研究. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2001, 24(5): 862—867.
- [29] 刘志峰, 张保振, 张洪潮. 基于超临界 CO₂ 流体的废旧线路板回收工艺的试验研究. 中国机械工程, 2008, 19(7): 841—845.
- [30] 刘红旗, 陈世兴. 机电产品绿色包装的综合分析. 机电产品开发与创新, 2002, (4): 36—37.
- [31] 刘飞, 曹华军. 绿色制造的理论体系框架. 中国机械工程, 2000, 11(9): 961—964.
- [32] 李方义, 李剑峰, 汪劲松等. 产品绿色设计研究现状及展望——一般理论及方法. 航空制造技术, 2004, (10): 73—78.
- [33] 曹华军, 刘飞. 制造过程环境影响评价方法及其应用. 机械工程学报, 2005, 41(6): 163—167.

- [34] 汪劲松,段广洪,李方义等. 基于产品全生命周期的绿色制造技术的研究现状和展望. 计算机集成制造系统,1999,5(4):1—8.
- [35] 向东,段广洪,汪劲松等. 基于产品系统的产品绿色度综合评价. 计算机集成制造系统, 2001,7(8):12—16.
- [36] 刘红旗,陈世兴. 产品绿色度的综合评价模型和方法体系. 中国机械工程,2000,11(9): 1013—1016.
- [37] 方芳,于随然,王成焘. 中国玉米燃料乙醇项目经济性评估. 农业工程学报,2004,20(3): 239—242.

第2章 产品的全生命周期建模

环境调和型产品在设计时,不论是进行产品结构的优化设计还是进行全生命周期性能仿真评价,产品全生命周期模型的建立都是它们核心的工作。产品全生命周期模型用来描述产品从设计、制造、贩卖、物流、使用、维修、拆解、检查、清洗到废弃等一生中的形态。下面从产品的模型化过程(指加工、组装、使用、拆解等操作)的模型化以及产品全生命周期模型化(过程之间的关系)三个方面作简要阐述。

2.1 产品的模型化

产品模型首先要能明确描述产品实体,包括其形态和构成物质,并基于此推理出构造产品的环境和经济成本;其次要量化描述产品功能及功能水平,以及因使用造成的功能裂化、可靠度裂化和因技术进步带来的(技术)价值消逝等,并能基于此推演出产品的使用过程;再者,由于生命周期设计决策的实施是面向一定物理结构单元的,更具体的如哪些零部件或模块被替换了、被再利用再制造了,哪些材料再循环了,因此产品模型必须对产品对象进行明确的、可拆分、可重组的物理结构划分。针对以上建模要求,基于一般化的产品结构形式,本书从产品-模块-零件三个层次进行产品建模。

1. 产品

产品是能够完成特定要求功能的实体。描述产品的固有参数包括:

成本与价格(元) 产品在制造时的成本和在市场上的销售价格,分别用于计算制造商和用户的全生命周期成本。

产品结构 主要指产品中各个模块、零件相互之间的联系。

零件清单 构成产品的零件清单。

2. 模块

模块由一组零件的连接构成。本书中定义模块为维修的基本单位。模块化结构在维修和再利用时对产品全生命周期产生较大影响,是主要的设计优化对象。描述模块的参数包括:

模块结构 构成模块的零件及其连接关系。

成本与价格 模块的制造成本和维修时的销售价格,主要用于计算故障模块维修、替换的制造商成本和维修服务收入以及用户的维修成本。

3. 零件

本书中将零件定义为产品拆解到不能再拆解的最小工程单位,是再循环处理时尽可能要分解达到的单位,废弃物处理者可直接对其进行分类处理。这种单位的定义在全生命周期设计中具有非常重要的意义。零件主要的固有参数包括:

材料清单 包括材料的种类、制造使用量、制造废料比例等参数,用以计算零部件制造的物耗和废物排放、再利用再循环处理的物质效益、填埋废弃的废物排放等。选择零件材料的原则是在满足功能和法律(如 RoHS 指令)要求的前提下,选择与模块内其他零件兼容性好且易于回收处理的种类。

寿命和故障函数 零件的寿命还分为物理寿命和功能寿命。物理寿命指零件的物理实体从开始使用到无法完成所要求功能的时间;功能寿命是指从开始使用到该功能“退出”市场的时间。一般来说,电子产品的功能寿命小于物理寿命。在以零件再利用为主要目的的全生命周期方案评价和优化中,零件的设计寿命是尤为重要的参数。

零件故障率的分布函数一般可采用浴盆曲线(图 2.1),并假设每个零件发生故障的概率相互独立。一般可认为产品通过出厂检验,已度过初期故障阶段,进入故障率较平稳的偶发故障阶段。

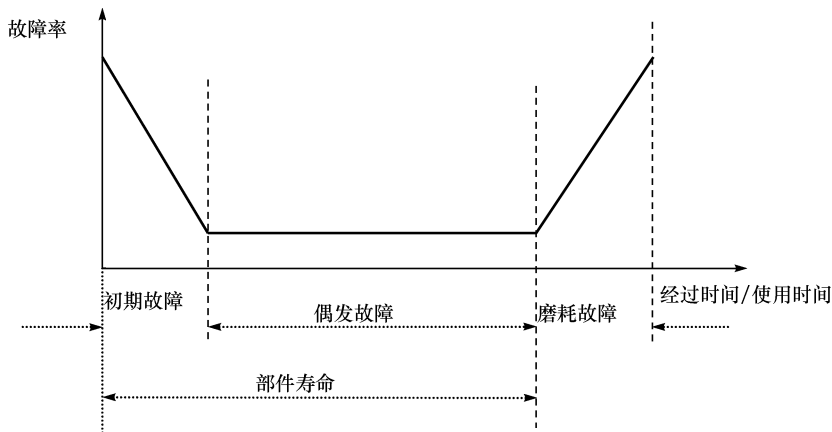


图 2.1 零件故障率的分布函数-浴盆曲线

制造成本 制造一个零件的成本。

制造能耗($\text{kW} \cdot \text{h}$) 制造一个零件所消耗的能量。

再循环方法(包括废弃) 如何处理废弃的零件。

再利用的可能性 能否再利用的决策机制。

一般来说,在设计阶段,产品结构还不确定,因此模块的构成会因为零件的增减、交换而不同,且不同的模块组合会对产品的全生命周期特性(LCC、维修、回收

处理等)产生影响。这就是在环境调和型产品设计时进行全生命周期仿真优化设计的原因。

2.2 过程的模型化

产品的开发、零件的加工、模块的组装、产品的使用、拆解等操作被称为“过程”。过程的模型化(建模)就是对过程中发生的事件(产生的能耗和废弃物、产生的成本等)进行描述。过程的建模将为全生命周期仿真评价时的评价标准建模提供基础,因此过程建模的质量将直接影响评价模型的精度,从而对产品方案评价的准确性,最终影响决策的质量。所以过程建模是生命周期建模的核心和评价工作开展的基础。

2.2.1 产品开发

一般来说,产品开发包括产品计划和产品设计两个阶段。而与产品设计并行进行的往往还有技术开发工作。

市场竞争遵守优胜劣汰的原则,如果所设计的产品无法被用户接受,投资的费用将无法收回,企业将无法生存。因此充分考虑市场需求,研发适销对路的产品很有必要,该阶段称之为产品计划阶段。计划开发产品时,首先要进行市场调研,彻底了解市场需求、竞争产品的特点并与待开发产品进行比较;然后考察本公司的技术实力和特点,判断是否具有竞争实力或者是否具有研发新技术的实力;最后分析市场销售及盈利预期情况。在综合分析判断上述事项的基础上提出对新产品的要求。

产品计划完成后转入产品设计阶段。设计阶段可细分为明确设计任务、概念设计、基础设计和详细设计四个阶段。图 2.2 是 Pahl 和 Beitz 提出的设计过程模型。

1. 明确设计任务

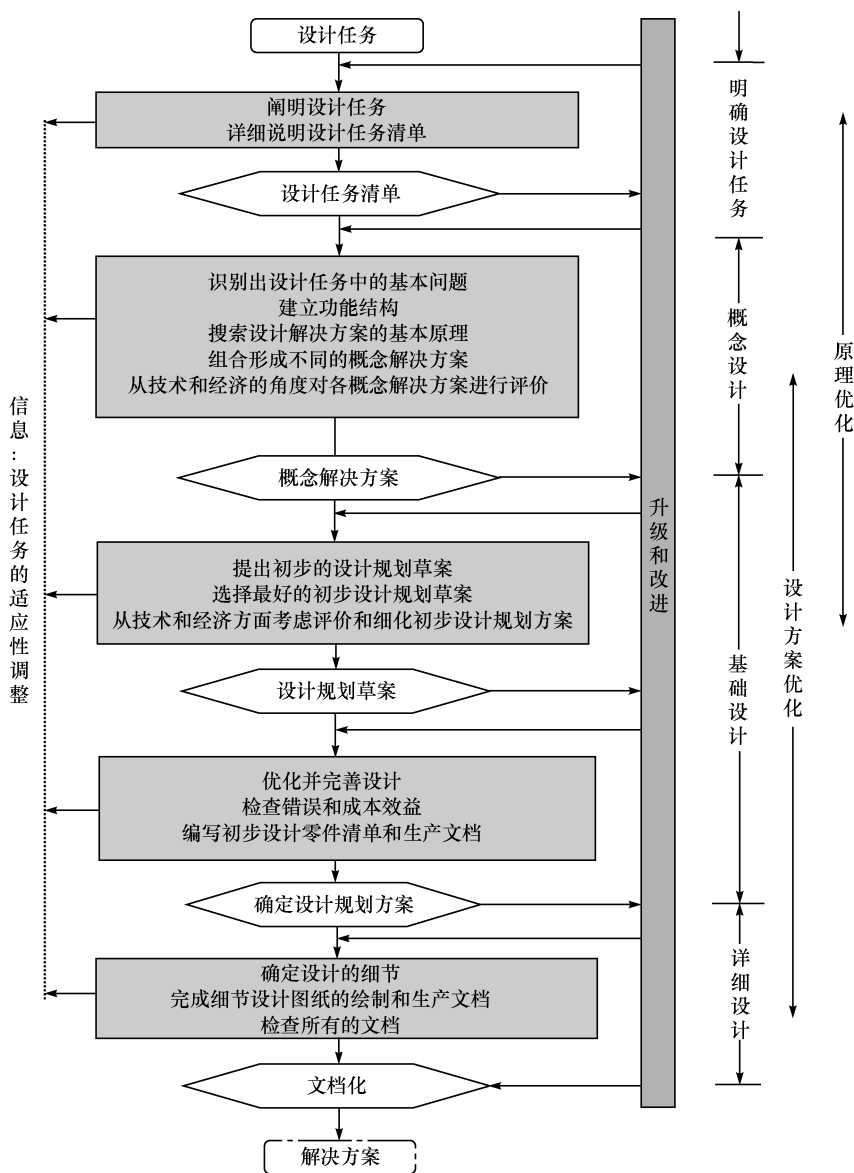
在市场调研的基础上,决定产品的功能、质量、价格,维修计划,废弃处理方式等。

2. 概念设计

分析确定功能实现的技术原理、主要结构形式、技术的来源(企业自有技术、购买专利和技术研发)等。

3. 基础设计

对概念设计阶段提出的要求进行量化,对结构进行有限元分析(运动、振动、强

图 2.2 Pahl 和 Beitz 提出的设计过程模型^[1]

度、疲劳、热等)和优化设计,进行零件实验、安全性设计与评价、可维修性设计以及经济性分析等。

4. 详细设计

各个零件尺寸、形状、公差、材料的确定,技术经济性再分析,各种文件档案撰写以及生产性设计(工装、机床、生产线、新工厂、生产外协等)。

设计过程的主要参数包括:

设计时间 指从产品计划到完成的详细设计时间,与产品面世时间(time to market)直接相关。

设计成本 所有与设计过程相关的成本。

设计结果 一般以图纸和文件的形式表示。

2.2.2 制造过程

1. 材料购买

矿石、原油等原始资源到制造产品所用材料生成的过程。该过程对环境影响的比较大,是环境影响量化评价的重要阶段。该过程的主要参数包括:

材料生成成本(元) = 重量 × 单位重量平均成本。

材料生成能耗(kW · h) = 重量 × 单位重量平均能耗。

材料清单 用于产品制造的材料种类及特性。

材料生产环境影响数据库 生成单位材料所耗用的物质和能量,其产生的固、液、气排放所导致的环境影响,用于进行产品生命周期环境影响评价(life cycle impact assessment)。

2. 材料在库保持

从钢铁、化工产业购买的新材料和从循环再利用过程回收材料的在库保存过程。这个过程虽然也存在成本和能量消耗,但通常为了建模简化起见不予考虑。该过程的主要参数包括:

材料在库量 仓库中材料的保存量,产品制造所需的材料要保持一定的库存量,如果因制造零件而消耗则需要补充。

材料库存时间 材料的经时劣化对零件寿命的影响。

3. 零件制造

工厂中完成的从材料到零件的制造、材料改性的过程。零件制造过程中将生产能量和物质消耗,以及相应的经济成本。为了达到所需要的零件的形状、数量和精度,需要对零件实施机械加工如图 2.3 所示、铸造、锻造、特种加工(激光、线切割、化学加工等)、成型加工等不同加工工艺,根据零件仓库的需要制造零件,从而补充零件仓库。以下是零件制造相关的参数:

零件清单 制造零件的清单(包括外购、外协加工零件)。

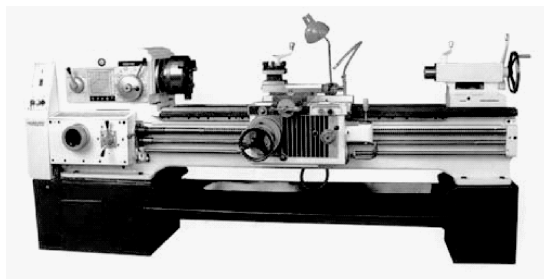
零件制造成本(元) = 每种零件的制造个数 × 单个制造成本。

零件制造能耗(kW · h) = 每种零件的制造个数 × 单个制造能耗,记录加工工艺及参数,用于 LCA 计算。

零件制造材料消耗 = 每种零件的制造个数 × 单个制造材料消耗。

其他过程物质消耗 如车床加工应用的切削液。

废弃物量 用于计算材料利用率。



(a) 普通车床



(b) 铣削加工中心



(c) 线切割机床

图 2.3 各种加工机床例图

4. 零件在库保存

本书中假设各种零件要有一定的库存量,以应对一定的生产和维修需求。为保持定量库存需要向零件制造商提供所需零件的信息,并根据模块组装、模块维修(再造)的需要提供零件。该过程的主要参数包括:

零件在库数量 仓库中存储的各类零件的数量。

零件库存时间 零件在库时虽然并未被使用,但经时劣化仍会对零件性能和使用寿命产生的影响。

5. 模块组装

将零件按照一定的要求组装成模块的过程。模块组装时,零件数决定成本和能耗。为了降低装配的成本和能耗,面向装配的设计是设计研究的一个重要方面。装配自动化是降低成本和工人劳动强度的主要措施之一。该过程的主要参数有:

模块组装成本(元) = 各个零件组装成本之和。

模块组装能耗(kW·h) = 各个零件组装能耗之和。

6. 模块在库保存

和零件仓库一样,模块仓库中各种模块要保持一定的库存量。为保持定量库存,该过程单元需要向模块组装部门提供所需补充模块的信息(模块的供给还可来自再利用和模块维修、再造过程单元),并根据新产品制造、维修交换的需要提供模块。与其他仓储一样,通常为了建模简化起见不考虑该过程能耗和成本。下面是模块仓库相关的参数:

模块在库数量 仓库中存储的各类模块的数量。

模块在库时间 零件的经时劣化对零件寿命的影响。

7. 产品组装

模块按照一定的要求组装成产品的过程。根据组装模块数计算成本和能耗。

产品组装成本(元) = 各个模块组装成本之和。

产品组装能耗(kW·h) = 各个模块组装能耗之和。

8. 检查

装配完成后,需要对整个产品进行检查。检查的项目包括:功能、可靠性、温度湿度的适应性、抗震性、抗水性等。检查项目及合格范围的制定是设计工作的重要内容。该过程单元的主要参数包括:

产品检查成本(元) 产品检查过程中产生的各种成本之和。

产品检查能耗(kW·h) 主要是长时间运行试验、高温试验的能耗。

2.2.3 物流

物流指从原材料生产地到生产场所以及从生产场所到消费场所之间的全部运动过程如图 2.4 所示。设计阶段需要考虑产品的运输条件(运输中的冲击、大型产品的运输方式)及营销渠道(从工厂直送还是经过零售商)。运输作为主要的物流活动,即会产生运输成本、也会对环境产生一系列的影响,主要表现在交通运输工具的大量能耗、对大气的污染和噪声污染等。物流运输无论是汽车、火车、船舶、还是飞机都需要大量的燃料,物流运输越发达、能源的消耗量就越大。

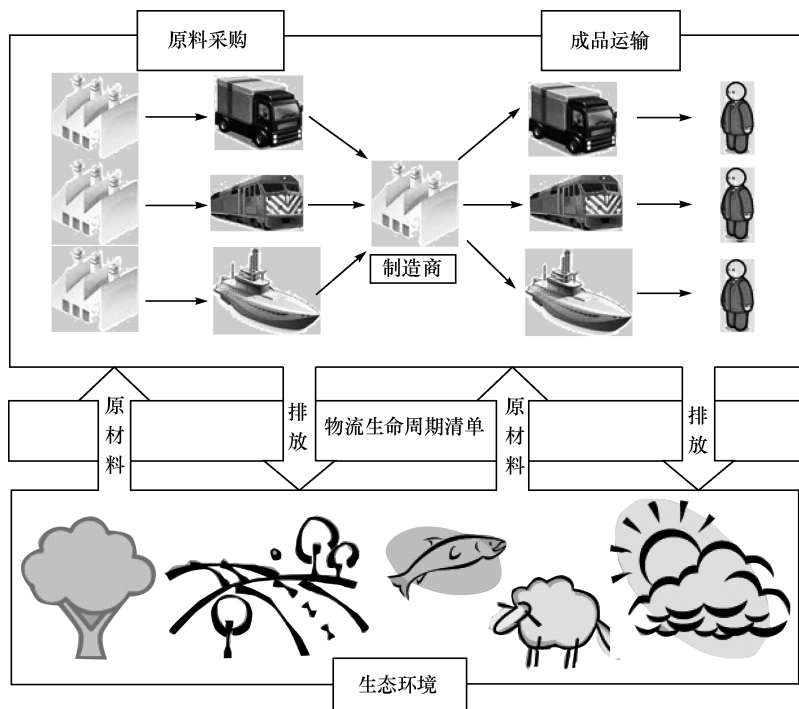


图 2.4 物流对环境的影响

该过程的主要参数有：

物流成本(元) 与运输距离、运输总量、运输方式有关。

物流对环境的影响 主要指物流因消耗能源和物质(如交通燃料)所造成的环境影响,可以用 LCA 方法进行评估。

2.2.4 使用与维修

1. 使用

使用过程单元主要描述产品的使用、维修、维护、废弃和更新等活动,即该单元

所造成的经济成本 and 环境影响。一般来说,消费者将根据一定的规则(标准)进行产品更新、维护、废弃等活动,可以进行一定的建模,当然消费者行为会因产品对象不同而不同。通常废弃产品是在产品出现故障的时候,而产品的故障是在零件发生故障时发生。对个体产品各零件的故障发生可根据已经定义的故障概率模型进行随机仿真。该过程的主要参数包括:

产品的使用能耗($\text{kW} \cdot \text{h}$)。

产品的累积使用成本(元)。

消费者的行为 消费者行为是指在什么条件下维修产品、什么条件下废弃产品等。

一般消费者的维修或是废弃产品行为与产品的维修总费用和产品故障间隔时间相关。维修总费用是指从产品使用时开始到当前时刻 t 的维修价格总和。单次维修价格一般包括需更换故障模块的销售价格和维修(人力)费用之和。顾客可承受的最高产品单位价格的维修费用(维修总费用除以产品价格),称之为容许维修成本。

产品的平均故障间隔时间(MTBF)指从产品使用时开始到当前时刻 t 之间,发生故障的平均间隔时间,如果其小于最小容忍故障间隔时间,用户认为故障过于频繁发生,可能会替换产品。

容许维修成本和最小容忍故障间隔时间是用户判断是否购买新产品的两个重要条件,可假设基于两者的更换产品行为判断都成立时顾客会购买新产品,废弃在用产品,其一不成立时顾客会选择接受产品维修服务,即

if ($\sum_i C_{\text{main}} > C_{\text{main},n} P_i$) & ($\text{MTBF}(T)_i < \text{MTBF}_{\text{min},ni}$),

then 顾客会购买新产品,废弃在用产品,

else 接受产品维修服务

其中, $C_{\text{main},n}$ 为用户 n 的容许维修成本; $\text{MTBF}_{\text{min},ni}$ 为用户 n 对产品 i 的最小容忍故障间隔时间。当然,如果产品全生命周期设计者假定了消费者的其他消费行为,或者制造商将提供其他的服务(如免费维修等),这些标准有可能发生变化。

2. 产品维修

检查确认故障位置并排除,使其恢复原有功能的过程称为维修。典型的维修过程如图 2.5 所示。检查就是对使用中的产品进行观测、确认是否发生故障。如何使产品结构更容易地实施检查是设计工作的重要内容。故障的定位就是确定故障的位置、性质和波及范围。根据故障的性质决定故障排除的方法(修理、更换、清扫等)。为了减少因故障停机造成的损失,故障的排除往往通过更换模块的方式进行。也就是检查确认故障模块后,用新模块取代故障模块,完成维修作业。被取代的故障模块进入模块检查过程。

维修过程中相关的参数包括:

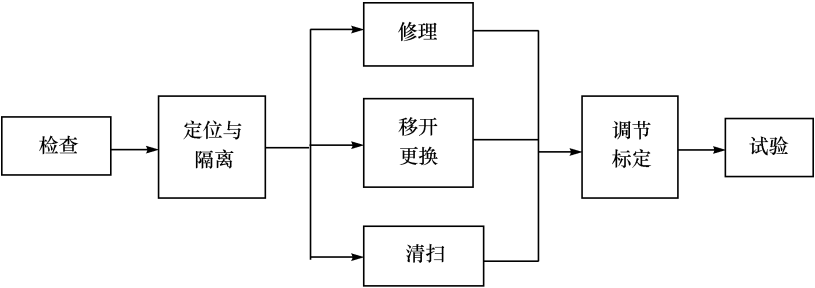


图 2.5 典型的维修过程

维修能耗(kW · h)=维修过程的能量消耗。

维修价格(元)=模块价格+维修费用,维修价格对用户来说是维修成本。

维修时间 指从停机到下一次开机的时间。

制造商维修利润(元)=维修价格-维修成本(模块成本和人工成本)。

2.2.5 回收处理

1. 产品回收和拆解

对消费者废弃的产品以一定比例回收,以模块为单位进行初步拆解。回收和拆解过程主要参数包括:

产品回收率 指消费者废弃的产品中有多大比例的产品可被回收处理。

产品拆解成本(元)=各个模块拆解成本之和。

产品拆解能耗(kW · h)=各个模块拆解能耗之和。

2. 模块检查

模块检查是指对从产品拆解和维修过程中送来的模块如何进行处理判别过程。首先对构成模块的每个零件再利用的可能性进行判定,一般指零件是否出现故障以及零件的剩余寿命(即零件的设计使用寿命减去已使用时间)是否仍大于质保期,若有些零件在设计时就被定义为不可再利用零件,则直接被判定为不可再利用,即

if (isnotMalfun(c)&isreuseful(c))&(LT(c)-UT(c)>GT(c)),
then 零部件可再利用

其中, isnotMalfun(c)指零件 c 是否故障的判断语句; isreuseful(c) 指零件 c 在设计时是否被定义为可再利用零件的判断语句; LT(c)指零件 c 的设计寿命; UT(c)指零件 c 的已使用时间; GT(c)指零件 c 的质保期。

如果模块中所有零件都可以再利用的话,可将模块清洁后直接再利用,否则要检查核算模块中可以再利用的零件的比例。如果该比例大于某一设定值(由设计者确定),就进入模块维修再造过程;否则进入模块拆解过程,即

if $\frac{n_{\text{reuseful}}(M)}{n(M)} > RR_{\min}$,

then 模块进行再利用再造,

else 模块进行拆解

其中, $n_{\text{reuseful}}(M)$ 指模块 M 内可再利用的零件数; $n(M)$ 指模块 M 内总零件数; $RR_{\min}$ 指模块可再利用性的下限制。

模块检查过程的其他主要参数包括:

模块检查成本(元)=模块检查过程中产生的成本。

模块检查能耗(kW·h)=模块检查过程中产生的能耗。

3. 模块维修

模块维修是指对模块中的部分不可再使用零件用新零件进行替换使该模块恢复原来性能的处理过程。模块检查过程中被判定为符合维修条件的模块,才被送入模块维修过程。模块维修所需更换的零件由零件仓库提供,维修后的模块放入模块仓库。故障零件和不可再利用零件被送入故障和废旧零件仓库。模块维修涉及的参数包括:

模块维修成本(元)=零件交换成本之和。

模块维修能耗(kW·h)=零件交换能耗之和。

4. 模块拆解

模块检查中判定为不能维修也不能再利用的模块进入模块拆解过程。模块拆解以零件为单元。模块拆解的成本和能耗包括:

模块拆解成本(元)=各个零件拆解成本之和。

模块拆解能耗(kW·h)=各个零件拆解能耗之和。

5. 零件检查

零件检查的目的是对模块分解后的零件能否再利用进行判别,其一般判定条件在模块检查中已述。如判定为不能再利用,送入故障和废旧零件仓库;如可能则送入零件仓库,待装配和维修过程使用。零件检查的相关参数有:

零件检查成本(元)=各个零件检查成本之和。

零件检查能耗(kW·h)=各个零件检查能耗之和。

6. 故障和废旧零件仓库

废旧故障零件仓库用来暂时存储零件检查和模块维修时被判定为不可再利用的零件或者故障零件。再根据零件种类进入物质、化学、热循环或者废弃过程的处理。通常为简化建模忽略该过程的能耗和成本。

7. 材料、化学循环

根据零件的材料种类进行物质、化学循环。循环处理的成本和能耗因材料种类各异。一般只有一定比例的材料能进行循环。不能循环的材料作废弃处理。

循环成本(元) = 材料重量 × 单位重量循环成本。

循环能耗(kW · h) = 材料重量 × 单位重量循环能耗。

循环率 因零件材料而异。

8. 热循环

热循环指通过零件燃烧获得能量的过程。这里的能量作为再循环的物质被使用。燃烧零件的一部分作为燃烧气体被废弃。热循环的主要参数包括：

能量循环成本(元) = 材料重量 × 单位重量热循环成本。

能量产生量(kW · h) = 材料重量 × 单位重量能量产生量。

废弃物产生比例 各种材料的废弃物产生比例各异。

9. 废弃

产品废弃的过程。这里指填埋。废弃的对象包括：在循环中产生的废弃物、零件检查产生的废弃物、产品作为整体被废弃等。产品废弃时的主要参数包括：

废弃物重量 用来计算物质循环率。

废弃成本(元) = 材料重量 × 单位重量废弃成本。

废弃能耗(kW · h) = 材料重量 × 单位重量废弃能耗。

2.3 全生命周期模型化

在 2.2 节中我们对产品全生命周期的过程建模进行了简要说明。本节中将简述由过程模型构成的产品全生命周期网络,称之为全生命周期模型(图 2.6)。

首先,将市场上对产品的需求信息送入“产品组装”过程进行产品组装,组装好的产品送入“产品仓库”并通过销售提供给用户,提供给市场对该产品的需求。产品组装后,“模块仓库”中相关模块的数量将减少。为使“模块仓库”中各模块的库存保持一定的数量,我们要向“模块组装”过程提出组装申请,并将组装好的模块送入“模块仓库”供新的产品组装时使用。同样,模块组装导致“零件仓库”零件数量的减少,因此要向“零件制造”过程提出零件制造请求,并将制造的新零件送入“零件仓库”。

使用中的产品如果发生故障,用户将根据之前的用户更换产品的条件进行判断,如果达到了更换的条件,产品就被送入“产品回收”或者“废弃”过程(以一定比例废弃);否则就进入“维修”过程。在“维修”过程中,故障模块被来自“模块仓库”的新模块替换,并将被送入“模块检查”过程,“模块仓库”也需要重新充实。修好后

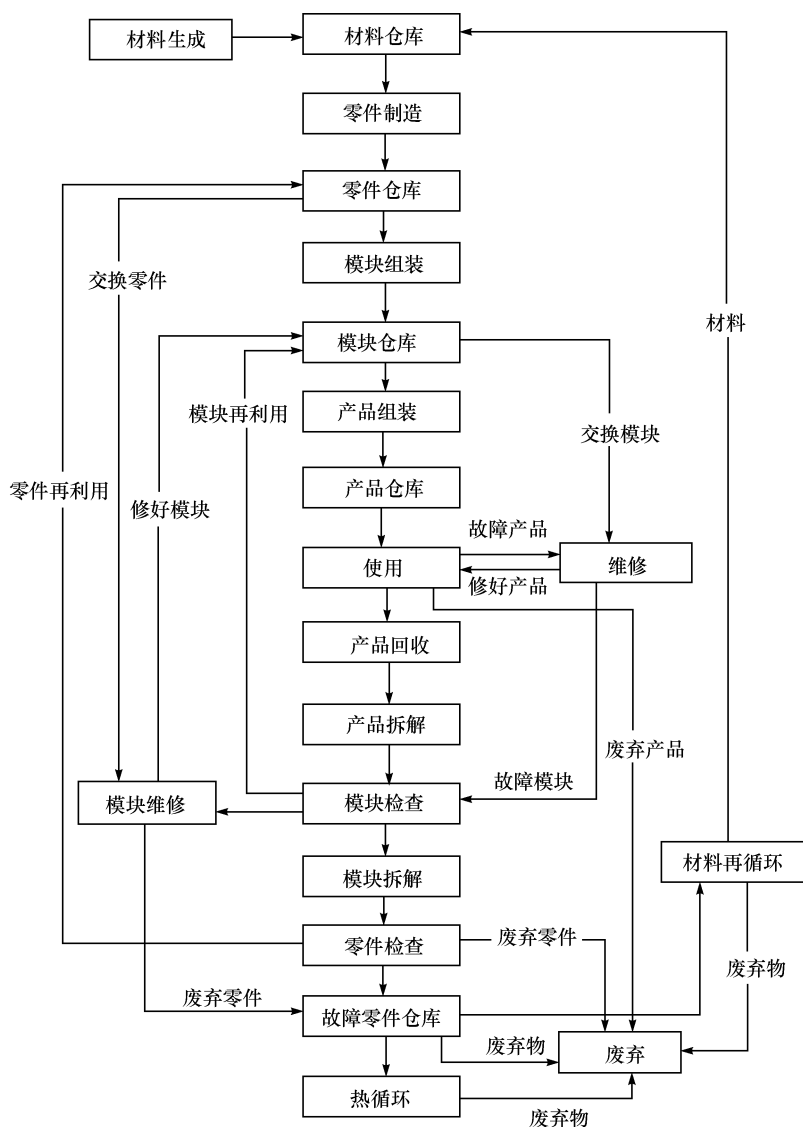


图 2.6 典型的产品全生命周期模型

的产品由用户继续使用。进入“产品回收”过程的产品将进行模块级的“产品拆解”，随后和“维修”过程送来的模块一起进行“模块检查”。检查后将根据已经设定的条件判断是进入“模块仓库”（为了再利用）、进行“模块维修”，还是进入“模块拆解”过程。在“模块维修”过程中，不可再使用的零件被“零件仓库”的新零件替换，并被送入“故障零件仓库”，维修好的模块送入“模块仓库”。对进入“模块拆解”过程被拆解的零件进行检查，根据不同情况直接送入“零件仓库”进行零件再利用、或者送入“故障零件仓库”、或者直接进入“废弃”过程。进入“故障零件仓库”的零件