

Green Design and Life Cycle Assessment of Mechanical Products

机电产品绿色设计 与生命周期评价

王晓伟 李方义 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

机电产品绿色设计 与生命周期评价

Green Design and Life Cycle Assessment
of Mechanical Products

王晓伟 李方义 著



机械工业出版社

本书是在国家高技术研究发展计划(863计划)“面向工程机械、机床机械产品的绿色工艺技术评估及相关基础数据库开发(2014AA041503)”与国家自然科学基金“基于绿色特征的产品方案设计建模研究(51175312)”等项目资助下撰写完成的。全书共分7章,包括机电产品生命周期多场景分析与建模,基于多尺度环境空间的影响评价方法,基于绿色特征的快速生命周期评价方法与设计方案综合评价,机电产品生命周期评价系统开发及工程应用等。本书提出了机电产品生命周期场景的概念及其预测模型;提出了环境空间多尺度划分方法及其特征化因子计算方法;提出了绿色特征概念,并将其应用于快速生命周期评价;开发了基于网络的机电产品生命周期评价系统。

本书可供从事机电产品设计研发和设计理论方法研究工作的工程技术人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电产品绿色设计与生命周期评价/王晓伟,李方义著. —北京:机械工业出版社,2015.8

ISBN 978-7-111-51147-2

I. ①机… II. ①王… ②李… III. ①机电设备-工业产品-无污染技术-设计 ②机电设备-工业产品-产品生命周期-评价 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第191961号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:李万宇

版式设计:霍永明 责任校对:赵蕊

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015年10月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.5印张·2插页·135千字

0001—2000册

标准书号:ISBN 978-7-111-51147-2

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

编辑热线:010-88379732 教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



前 言

针对我国日益严峻的生态环境和资源问题,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出,我国发展必须全面落实科学发展观,加快转变经济增长方式,把节约资源作为基本国策,发展循环经济,保护生态环境,加快建设资源节约、环境友好型社会,促进经济发展与人口、资源、环境相协调,实现可持续发展。机电产品涉及工业与民用的大部分领域,已成为当今社会生产和人们生活的基本要素之一,特别是在制造业大国的我国,机电产品对国民经济的影响举足轻重,更是出口创汇的支柱产业。因此,研究机电产品的可持续发展具有重要的学术价值和现实意义。

绿色设计与绿色制造(Green Design & Green Manufacture)是减小产品全生命周期环境影响,提高资源利用率的关键技术,被公认为制造业可持续发展的关键共性技术,也是当前国内外学术研究的热点领域。实施绿色设计与绿色制造的关键问题是要对不同设计方案、制造工艺、使用过程、废弃处理等的环境影响进行综合分析、评价和寻优。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)作为一种量化的环境管理工具是绿色设计与绿色制造的重要理论和技术支撑,自20世纪60年代末提出以来,就受到了社会各界的广泛关注和持续研究,取得了长足的发展,目前已成为评价产业活动对环境、经济和社会的可持续性影响的常用技术。

作者及课题组成员,自20世纪90年代末期开始,从事绿色设计与绿色制造领域的研究,在国家高技术研究发展计划(863计划)“面向工程机械、机床机械产品的绿色工艺技术评估及相关基础数据库开发(2014AA041503)”、国家自然科学基金“基于绿色特征的产品方案设计建模研究(51175312)”、

“十一五”科技支撑计划“产品生命周期评价技术及软件工具研究(2006BAF02A01-03)”等项目支持下,对机电产品的绿色设计及生命周期评价技术进行了较系统的研究,现将部分研究内容编纂成本书(主要内容源于作者的博士论文),以供大家参考。

本书针对当前LCA方法对产品生命周期场景特征反映少,难以有效支持绿色设计的现状,对面向机电产品方案设计的生命周期评价关键技术进行了系统研究。提出了产品生命周期场景概念,建立了场景属性表达模型与概率矩阵;以单个产品和产品类的场景模型为基础,构建了机电产品设计方案的生命周期场景预测模型。基于现行的法律法规,对环境影响空间特性及其尺度进行了划分,提出了环境空间特征化因子计算方法;在ISO 14044框架下,建立了基于多尺度环境空间的生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)方法框架。提出了三元组合的绿色特征概念,通过筛选函数对存在形式各异的大量绿色信息进行筛选、提取并聚合为绿色特征矩阵;提出了基于绿色特征的快速生命周期评价(Rapid LCA, RLCA)模型和基本流程;提出了基于多元回归的LCA敏感性和不确定性分析方法和流程。建立了基于绿色特征的设计方案表达模型;从环境、技术、经济三方面进行综合考虑,建立了递阶型设计方案综合评价指标体系;结合层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和模糊综合评价法(Fuzzy Comprehensive Evaluation, FCE)建立了绿色设计方案的AHP-FCE综合评价模型。开发了基于网络的机电产品生命周期评价系统(Mechanical Products LCA System, MLCAS);应用MLCAS对Y80电动机进行了LCA评价,并对其进行了敏感性和不确定性分析。

然而,一方面由于机电产品的多样性及其生命周期的复杂性,另一方面由于绿色设计与生命周期评价技术涉及多学科交叉,目前国内外的研究尚处于发展探索阶段,无论在理论方法还是在技术工具上都需进一步研究和深化。作者希望本书的出版,能在一定程度上促进和拓展机电产品绿色设计与绿色制造研究的途径和思路。限于作者的能力和水平,书中不当之处,敬请读者批评指正。

本书研究过程中，山东建筑大学机电工程学院领导和同事们给予了大力支持，同时得到了山东大学可持续制造研究中心李剑峰教授、王黎明博士的指导和帮助，谨在此向他们致以衷心的感谢。在本书撰写过程中，参考和引用了大量国内外相关文献，在此对这些文献的作者一并表示感谢。最后向参与本书审稿工作的专家表示真诚的感谢。

作者

2015年7月

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景概述	1
1.1.1 自然资源大量消耗	1
1.1.2 生态环境持续恶化	2
1.1.3 可持续发展战略的提出与兴起	3
1.1.4 绿色设计相关技术的早期研究	3
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 绿色设计方法	6
1.2.2 生命周期评价技术	9
1.3 课题提出与研究内容	15
1.3.1 课题提出	15
1.3.2 研究内容	16
1.3.3 章节安排	18
第 2 章 机电产品生命周期多场景分析与建模	19
2.1 机电产品生命周期环境属性分析	19
2.1.1 机电产品生命周期阶段分析	20
2.1.2 机电产品生命周期环境属性	23
2.2 机电产品生命周期场景特征建模	27
2.2.1 机电产品生命周期场景分析	27

2.2.2 产品方案生命周期场景建模	29
2.3 本章小结	32
第3章 基于多尺度环境空间的影响评价方法	33
3.1 环境影响类型及其特征化方法	33
3.1.1 资源消耗	34
3.1.2 生态环境影响	38
3.1.3 人体健康危害	41
3.2 环境空间分析与尺度划分	42
3.2.1 资源空间	43
3.2.2 辐射类影响区域	44
3.2.3 噪声区域	44
3.2.4 空气质量功能区	45
3.2.5 地表水功能区	46
3.2.6 土地功能区	47
3.2.7 生态环境区域	47
3.2.8 酸雨和二氧化硫控制区	48
3.3 环境空间特征化因子计算方法	48
3.3.1 环境空间特征因子	49
3.3.2 环境空间特征因子举例	49
3.4 基于多尺度环境空间的 LCIA 方法	51
3.5 本章小结	54
第4章 基于绿色特征的快速生命周期评价方法	57
4.1 绿色特征	57
4.1.1 产品生命周期绿色信息	57
4.1.2 绿色特征的概念和内涵	58
4.1.3 绿色特征的提取和聚合	60

4.2	生命周期评价简化途径	62
4.2.1	完整的生命周期评价	62
4.2.2	简化的 LCA 方法	63
4.3	基于绿色特征的 RLCA 方法	66
4.3.1	传统的 LCA 流程	66
4.3.2	基于绿色特征的 RLCA 流程	67
4.3.3	基于绿色特征的 RLCA 模型	68
4.4	LCA 不确定性和敏感性分析	71
4.4.1	LCA 不确定性分析	71
4.4.2	多元回归分析方法	74
4.4.3	基于多元回归的 LCA 敏感性和不确定性分析	75
4.5	本章小结	77
第 5 章 基于绿色特征的设计方案综合评价		79
5.1	基于绿色特征的设计方案建模	79
5.1.1	基于功能结构的设计建模	79
5.1.2	基于绿色特征的设计建模	81
5.2	绿色设计方案评价指标体系	86
5.2.1	绿色设计方案评价指标体系	86
5.2.2	评价指标的标准化方法	89
5.3	AHP-FCE 综合评价模型	93
5.4	本章小结	97
第 6 章 机电产品生命周期评价系统开发及工程应用		99
6.1	MLCAS 系统框架结构与设计实现	99
6.1.1	系统框架结构和流程	99
6.1.2	系统设计与实现	101
6.2	Y80 电动机实例研究	104

6.2.1 Y80 电动机基本结构及参数	104
6.2.2 Y80 电动机生命周期场景分析	105
6.2.3 Y80 电动机生命周期评价	109
6.2.4 不确定性和敏感性分析	116
6.3 本章小结	120
第7章 总结与展望	123
7.1 总结	123
7.2 研究展望	124
参考文献	125

第1章

绪 论

1.1 研究背景概述

自18世纪中叶工业革命以来,随着生产力的迅猛发展,人类社会发生了翻天覆地的变化,物质需求得到极大满足的同时,资源与环境问题也日益突出。环境与发展已成为近半个世纪以来全球性关注的重大问题之一。

➔ 1.1.1 自然资源大量消耗

产品是人类创造繁荣的社会经济,享受丰富物质生活的重要媒介之一。量大面广的机电产品几乎涵盖了当今社会的大部分工业与民用领域,已成为社会生产和人们生活的基本要素之一。特别是在制造业大国的我国,机电产品对国民经济的影响举足轻重,更是出口创汇的支柱产业。据统计^[1],国民经济各部门使用的21类机电产品所消耗的电力占全国发电量的60%~80%,所消耗的汽油占全国汽油产量的55%~60%。

作为人类改造自然与利用自然的产物,机电产品及其生产过程归根到

底离不开自然资源与环境。其中使用历史最久、消耗最多的是矿物燃料和金属矿藏。虽然通过勘探技术的进步能使得探明储量在短时期内有所增加，但是它们在地壳中的含量都是有限的，资源总储量不可否认是在不断减少的，而能够循环利用或回收再利用的很少，且利用程度有限，况且矿物燃料则是完全无法重复利用的。资料显示^[2]，现阶段中国百分之九十以上的能源、八成以上的工业原料、七成以上的农业生产资料来源于矿产资源。世界范围内，按照目前的矿产开采水平，大部分矿产储量可开采 20 ~ 40 年，石油约为 40 年，煤也只有 200 年左右，作为机电产品及其生产过程中不可或缺的稀有金属，其消耗速度更加惊人^[3]。这与人类生存发展时间相比微不足道，而目前我们还没有找到这些矿产可能的替代物。

1.1.2 生态环境持续恶化

大量无节制的资源利用与转化过程直接对我们赖以生存的生态环境产生了显著影响。从近代历史上的几次重大环境污染事件（例如 20 世纪 40 年代美国洛杉矶光化学污染事件，50 年代初期英国伦敦的烟雾污染事件，60 年代初期日本水俣污染事件等）到近些年的极端天气事件的“常态化”（海啸、沙尘暴、干旱、暴雨、高温等频繁发生，且一再突破历史记录），人类正在面临着更加复杂和不断恶化的生态环境，主要表现在人体健康的破坏、全球气候变暖、臭氧层破坏、水体污染、生物多样性消失等问题。

现代人类生活方式的改变在某种程度上加速加剧了环境的变化。例如越来越短的产品使用寿命（并非产品丧失了原有的功能，而是消费者选择了更新、更好的产品）造成数量越来越多的废弃物；越来越多的人选择汽车作为代步工具，汽车尾气已成为城市空气质量下降的主要原因；空调的使用范围与时间越来越长，消耗了大量的电力能源。

我国作为人口最多，经济发展最快的发展中国家，可以预见，未来相当长的时间内，伴随着社会与经济的进一步发展，环境的瓶颈制约与胁迫影响将日益严峻^[4]。

1.1.3 可持续发展战略的提出与兴起

随着世界人口的不断增加,生活水平不断提高,人类对能源和资源的开发利用强度愈来愈高,我们在感叹工业化进程带来的伟大变革的同时,不得不面对资源短缺、生态环境恶化的严峻现实。20世纪70年代初期,世界各国普遍意识到传统发展模式给人类带来的生存危机,以及社会发展与环境友好之间的重要性,于1972年发表了《联合国人类宣言》,提出了环境问题的极端严重性,并宣告人类采取共同行动保护地球。自此可持续发展的战略开始在世界范围内得到重视和发展。李方义在其博士论文^[5]中,对世界各国早期环境保护方面的法规政策进行了系统的总结。

我国中长期科技发展规划(2006—2020)明确指出,把节约资源作为基本国策,发展循环经济,保护生态环境,促进经济发展与人口、资源、环境相协调,实现可持续发展^[6]。

1.1.4 绿色设计相关技术的早期研究

产品设计是改变产品生产方式的关键环节,也是实现可持续战略的基本途径之一。

绿色设计(Green Design)又称生态设计(Ecological Design)、面向环境的设计(Design for Environment)、环境意识设计(Environmental Conscious Design)或生命周期设计(Life Cycle Design),提法虽有所不同,但内涵是相似的。刘志峰^[7]将其归纳为:在产品生命周期内,着重考虑产品环境属性(自然资源的利用、环境影响和可拆卸性、可回收性、可重复利用性),并将其作为设计目标,在实现其应有的基本功能、使用寿命、经济性和质量等基础上,同时使产品满足生态环境目标要求。

因此,绿色设计与绿色制造作为制造业可持续发展的关键、共性支撑技术得到了长足的发展。绿色设计技术的早期研究主要集中于以下几个方面。

1. 生命周期评价技术

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 的概念起源于 20 世纪 60 年代末。1969 年可口可乐公司委托美国中西部研究所 (Midwest Research Institute, MRI) 对饮料容器进行了评价^[8], 揭开了生命周期评价的序幕。

1990 年, 国际环境毒理学和化学学会 (Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC) 对生命周期评价进行了定义^[9]: 生命周期评价是一个评价产品过程或其活动给环境带来的负担的客观方法。该方法通过识别和量化所用的能量、原材料以及废物排放来评价与产品及其行动有关的环境责任, 从而得到这些能量和材料应用以及排放物对环境的影响, 并且对改善环境的各种方案做出评价。评价包括产品及其过程或行动的整个生命周期。

国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 于 1993 年 6 月正式成立了“环境管理标准技术委员会” (TC207), 专门负责环境管理工具及体系的国际标准化工作, 其中 SCS 分委员会专门负责 LCA 标准的制定。该组织于 1997 至 2000 年间陆续颁布了生命周期评价系列标准 (包括原则与框架 ISO 14040: 1997; 目的与范围的确定与清单分析 ISO 14041: 1998; 生命周期影响评价 ISO 14042: 2000; 生命周期解释 ISO 14043: 2000), 并在 2006 年进行了修订 (原则与框架 ISO14040: 2006 和 ISO14044: 2006^[10,11])。我国随即颁布了对应的生命周期评价系列国家标准。

美国环境保护署 (EPA) 对 LCA 早期的 36 种主要影响评价方法进行了分析^[12]。

2. 绿色设计基本概念、理论方法研究

绿色设计的概念于 20 世纪 90 年代初期提出并迅速成为研究的热点。早期的研究主要集中于基本概念和方法体系两个方面。

Alting Leo 较早提出了全生命周期设计理论^[13], 分析了从产品概念设计

到产品使用、废弃处理等环节中的环境影响问题，对产品设计中减少能源消耗和便于拆卸的方法和技术进行了探讨^[14,15]，并从功能、结构、生命周期和零部件四个层次建立了绿色产品设计过程的总体框架^[16]。

Zuest R. 等对产品生命周期中的环境影响定量评价方法进行了讨论，提出了考虑成本、材料流、能量流、危害、风险和伦理影响等因素的综合量化评价思路^[17]。Brezet H. 建立了一种绿色设计分类模型^[18]，他将绿色设计分为四种类型，即产品改进、产品再设计、功能创新和系统创新，按此次序产品的环境性能或生态效益的改进程度不断提高，但实现的时间却会越来越长。

Zhang Y. 等学者在 GQFD 理论研究基础上，综合考虑质量、环境和成本三方面内容又提出了改进的 GQFD- II 方法^[19]。该方法包含三个阶段：通过质量屋、环境屋和成本屋识别技术需求；通过对质量、环境和成本的评价生成产品概念设计；通过各生命周期矩阵模型对产品结构和过程进行设计。

3. 软件工具及实例研究

随着理论研究的不断深入，很多企业和研究者开始尝试采用绿色设计方法对产品的环境性能进行改进设计，例如文献 [20-22] 分别介绍了绿色设计与绿色制造技术在通信产品中的应用。文献 [23-25] 对计算机产品的主要环境影响进行了评价和改进设计。文献 [26, 27] 对材料环境性能及其生产过程中的能源消耗与环境影响进行了研究。Li K. K. 应用生命周期评价方法对产品设计中的材料最小化技术进行了研究，通过减少产品输入输出信息分析，减少资源的消耗和环境排放^[28]，并根据我国台湾地区的应用经验，提出了基于绿色技术的 LCA 框架^[29]。

在绿色设计实践研究中，有些研究者和机构逐渐开始从事绿色设计软件工具和数据库的开发建设，并有许多企业参与其中。例如 Glantschnig W. J. 对绿色设计早期所面临的问题与挑战进行了系统分析，指出复杂的绿色产品设计需要实用化的工具支持^[30]。20 世纪 90 年代初期，Navinchandra

D. 对绿色设计工具进行了初步的研究^[31], 提出用绿色设计指数帮助设计者完成评价、比较和决策。Wixom M. R. 等开发了第一代机电产品的“Green Design Advisor”原型系统^[32]。Kassahun B. 等人面向电子器件的绿色设计建立了一种设计软件的框架结构^[33]。Feldmann K. 等人基于面向环境设计理论新成果对 GDA 软件进行了提高和改进^[34]。

欧美各国由企业和研究机构联合开发绿色设计支持软件的模式取得了巨大成功。例如由荷兰工业界、研究机构和政府部门共同开发 ECO-indicator、德国 PE 国际有限公司开发 Gabi、荷兰 PRé 咨询公司开发 Simapro、法国 Ecobilan 公司开发 TEAMTM 软件等经过多个版本的改进和数据库的扩充后, 目前在世界各地应用非常广泛。

1.2 国内外研究现状

针对资源与环境日益恶化的严峻局面, 绿色设计相关技术在早期研究基础上得到了迅速发展。国内外的主要研究集中在以下几个方面:

1.2.1 绿色设计方法

1. 产品信息建模与评价

在产品绿色设计及其评价过程中, 如何将环境属性尽早引入产品信息模型吸引了大量学者的注意。

刘红旗等将产品结构、功能、生命周期环境影响及设计需求有机结合在一起, 尝试建立较为系统的产品绿色设计信息模型和评价体系^[35]。向东等利用产品系统概念, 基于产品功能模块进行绿色信息的组合及评价, 从而实现产品的数据收集和动态描述^[36]。Park J. 和 Seo K. 提出了一种基于知识近似的生命周期评价系统框架^[37], 用于协同设计的环境, 该系统利用人工神经网络允许用户在更大的范围内接触与产品设计相关的近似信息, 以提高产品环境效率。黄海鸿等应用协同设计原理来进行产品绿色设计, 通

过分析协同绿色设计中的设计信息流,采用蚁群算法和贝叶斯理论来优化设计方案^[38]。李建军等探讨了面向对象数据库的产品信息表示和操作方法及产品结构信息的存储技术^[39]。

Zhu J. Y. 和 Deshmukh A. 采用贝叶斯网络针对生命周期评价中的不确定信息进行分析,通过对需求域和产品设计信息域关系推导,对产品设计的的关键节点进行跟踪,进而对产品设计早期的决策提供支持^[40]。

Dunmade I. 等针对不同来源与技术背景、不同使用状况下的多产品组成的复杂系统的环境影响问题进行分析,提出了多生命周期设计的概念,并将其应用于木薯加工机械的设计^[41]。Hossain K. A. 等提出了一种基于风险评估的环境影响评价方法^[42],该方法将产品生命周期分为两个域,原材料生产与供应域和门对门的工艺域,每个域可以分别进行影响的逆分析,从而便于工艺设计方案的管理和评价。

张雷等将绿色产品的配置约束分为建议性约束和强制性约束,将一维约束过滤模块和建议性约束满足度计算模块融入回溯算法中^[43],以实现产品环境属性与功能、结构及经济属性的优化配置。陈建等将可拓学中转换桥方法引入绿色设计冲突消解研究中^[44],将绿色设计中的冲突问题表达为形式化基元模型。

2. 模块化绿色设计方法

张雷等将环境影响因素纳入产品族规划的考虑范畴,从拆卸、回收、环境影响以及经济性四个方面对产品族内部结构单元的绿色性进行量化分析,通过对绿色信息的快速集成,建立一种面向绿色设计的产品族规划方法^[45]。李方义等提出了一种应用于离散型机电产品多目标模块化分析的初步框架^[46,47],对利用模糊图论和 AHP 方法解决机电产品绿色设计决策的多目标问题进行了研究。杨继荣等研究了面向大规模定制生产的产品绿色设计模块化方法,对绿色度和模块化评价方法和实现步骤进行了初步探讨^[48]。Tseng H. 等将工程属性添加到产品部件的联络图模型中,将组合式遗传算法和改进后的交叉机制用于族划分和产品模块设计^[49]。Smith S. 等人提出