



工业和信息化部“十二五”规划教材

现代设计理论和方法

Xiandai Sheji Lilun He Fangfa

史冬岩 滕晓艳 钟宇光 朱世范 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材

现代设计理论和方法

史冬岩 滕晓艳 钟宇光 朱世范 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了现代设计的理论基础、基本方法、关键技术和应用领域,包括产品设计中的方案设计、创新设计思维法则、发明问题解决理论(TRIZ)、技术系统分析、优化设计、机械动态设计和绿色设计与评价等现代设计理论与方法分支学科中的重要内容。本书是编者在多年从事现代设计方法教学科研经验的基础上编写的,在内容安排上,着重介绍一些基本概念、实施方法和关键技术,对每个章节的基本理论和方法都进行了系统地归纳。在介绍实施方法时,突出思路和方法的多样化,以开阔学生思路,培养学生分析问题和解决问题的能力,并初步掌握某些现代设计方法在机械工程中的应用。本书内容新颖实用,结构体系完整,重点突出,理论联系实际,由浅入深,易于阅读和自学。

本书可作为高等院校工程类各专业研究生或高年级本科生的教材,也可作为从事设计研究开发工作的学者与工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代设计理论和方法 / 史冬岩等编著. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2016.2

ISBN 978-7-5124-2032-8

I. ①现… II. ①史… III. ①设计学—高等学校—教材 IV. ①TB21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 009269 号

版权所有,侵权必究。

现代设计理论和方法

史冬岩 滕晓艳 钟宇光 朱世范 编著

责任编辑 赵延永 张艳学

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:18.25 字数:467 千字

2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-2032-8 定价:42.00 元

前 言

现代设计方法是随着当代科学技术的飞速发展和计算机技术的广泛应用而在设计领域发展起来的一门新兴的多元交叉学科。它是以计算机辅助设计技术为主体,以知识为依托,以多种科学方法及技术为手段,综合考虑产品特性、环境特性、人文特性和经济特性的一种系统化设计方法。

现代设计方法课程是高等院校为适应当代科技发展和我国机械工程学科发展战略需要,面向 21 世纪教学内容和课程体系改革、培养高质量的高级创新人才而开设的一门必修课程。编者多年承担“现代设计方法”研究生课程的教学工作,并根据教育部面向课程体系和教学内容改革计划项目的指导思想,探索了适用于创新人才培养的开放式研究性教学模式;同时还聘请海内外知名学者,开展了与国内外专家共建研究生课程的项目建设。编者结合高等教育的深入推进与本课程的教学发展形势,广泛听取专家和研究生的意见与建议,优化课程教学内容,进行了“现代设计方法”精品课程的教材建设工作。

本书深入贯彻国务院关于《中国制造 2025》的通知中“提高创新设计能力”的指导思想,响应工业和信息化部面向 21 世纪国家新型工业化、信息化和国防现代化建设对高层次创新人才的战略需求,体现信息化和工业化深度融合、机械化与信息化复合发展,特点突出、实用性强的工业和信息化特色教材。本书从工程适用性角度精选内容,坚持“立足创新、夯实基础、突出重点,强化特色、拓宽面向”的指导思想,紧扣设计科学规律的研究与应用,强调基础知识和创新实践相结合。全书内容分为三篇,共 8 章。

第一篇,产品设计篇,包括第 1 章产品设计基础,第 2 章创新设计基础。

第二篇,TRIZ 理论篇,包括第 3 章 TRIZ 理论概述,第 4 章技术系统与资源分析,第 5 章问题的解决方法。

第三篇,设计方法篇,包括第 6 章优化设计方法,第 7 章机械动态设计,第 8 章绿色设计与评价。

本书突出广义设计领域中普遍运用的科学技术方法和设计规律、创新思维法则和技法,侧重多种现代设计方法的综合和交叉,注重培养学生创新设计意识和创新思维。学生通过学习能够初步掌握对复杂现代工程设计问题进行研究和分析的基本方法。本书适用于高等院校工程类各专业的研究生或高年级本科生教材,也可作为从事设计研究开发工作的学者与工程技术人员的参考书。

本书第 1 章由史冬岩、滕晓艳撰写,第 2、3、4 章由史冬岩撰写,第 5 章由曹福全撰写,第 6 章由滕晓艳撰写,第 7 章由钟宇光撰写,第 8 章由朱世范撰写。全书



由史冬岩和滕晓艳统稿。

编者在编写过程中收集、选用了部分科研和教学研究资料,参考了大量论文、专著、教材,以及相关的电子文献。感谢美国罗格斯大学 Gea Haechang 教授、英国诺丁汉特伦特大学苏代忠教授长期以来在本课程内容规划、设计理论与实践教学方面给予的指导和帮助。特别感谢孙国强教授对于本书编撰过程中提供的帮助与指导。工业和信息化人才教育与培养指导委员会、黑龙江省教育厅和哈尔滨工程大学对本书的出版给予了资助,编者谨对资助项目管理机构表示衷心的感谢。此外,课题组的江旭东、石先杰、王志凯、王青山、张开朋、韩家山、颜凤眠、任高晖、张涛等博士后及研究生在本书的编写过程中做了很多工作,在此深表感谢。

本书被评选为工业信息部“十二五”规划教材,并得到了北京航空航天大学出版社的大力支持,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中不当不足之处,衷心地希望同行专家和读者批评指正。

作 者

2016 年 1 月

目 录

第一篇 产品设计篇

第 1 章 产品设计基础	3
1.1 概 述	3
1.1.1 产品设计的产生背景	3
1.1.2 产品设计的定义与内涵	3
1.1.3 产品设计的目的与重要性	4
1.2 产品设计过程	4
1.2.1 产品设计类型	5
1.2.2 产品设计原则	5
1.2.3 产品设计过程	6
1.3 产品设计任务	8
1.3.1 设计任务的依据与步骤	8
1.3.2 调查研究	8
1.3.3 产品开发可行性分析	9
1.3.4 产品设计任务书(设计要求明细表)	10
1.4 基于功能的产品方案设计	12
1.4.1 方案设计的任务与步骤	12
1.4.2 主要设计问题的抽象	12
1.4.3 功能结构的建立与分析	14
1.5 设计方案的评价	26
1.5.1 方案评价的内容	27
1.5.2 方案评价的目标	27
1.5.3 方案评价的方法	29
习 题	37
参考文献	37
第 2 章 创新设计基础	38
2.1 概 述	38
2.1.1 创新设计的意义	38
2.1.2 创新设计的内涵	38
2.2 创造力和创造过程	39
2.2.1 工程技术人员创造力开发	39
2.2.2 创造发明过程分析	40
2.3 创新思维的基本方法	40



2.3.1 创新思维的基本分类	40
2.3.2 创新思维的活动方式	41
2.4 创新法则与技法	41
2.4.1 创新法则	41
2.4.2 创新技法	42
2.5 创新成功案例	46
习 题	47
参考文献	47

第二篇 TRIZ 理论篇

第 3 章 TRIZ 理论概述	51
3.1 TRIZ 理论的定义	51
3.1.1 TRIZ:发明问题解决理论	51
3.1.2 TRIZ 方法论	52
3.2 TRIZ 理论的思维方式	53
3.2.1 发明理论的发明	53
3.2.2 创新思维的障碍	54
3.2.3 TRIZ 理论思想	56
3.3 经典 TRIZ 理论	57
3.3.1 经典 TRIZ 理论的建立	57
3.3.2 经典 TRIZ 理论的结构	61
3.4 TRIZ 理论的新发展	62
3.5 创新案例	63
习 题	64
参考文献	64
第 4 章 技术系统与资源分析	66
4.1 技术系统的基本内容	66
4.1.1 技术系统的定义	66
4.1.2 技术系统的功能	66
4.1.3 技术系统的分析方法	67
4.2 技术系统进化法则	72
4.2.1 阿奇舒勒与技术系统进化论	72
4.2.2 8 大技术系统进化法则	73
4.2.3 技术系统进化法则的应用	78
4.3 TRIZ 中解决问题的资源	80
4.3.1 资源的概念	80
4.3.2 资源的类型	80
4.3.3 资源的寻找与利用	81



4.4 最终理想解·····	83
4.4.1 TRIZ 中的理想化·····	83
4.4.2 理想化的方法与设计·····	84
4.4.3 最终理想解的确定·····	85
习 题·····	86
参考文献·····	87
第 5 章 问题的解决方法 ·····	88
5.1 技术系统中的矛盾·····	88
5.1.1 矛盾的定义·····	88
5.1.2 矛盾的类型·····	88
5.1.3 不同矛盾类型间的关系·····	89
5.2 发明原理和矛盾矩阵·····	90
5.2.1 40 个发明原理·····	90
5.2.2 39 个通用工程参数与矛盾矩阵·····	90
5.2.3 阿奇舒勒矛盾矩阵的使用·····	93
5.2.4 物理矛盾和分离原理·····	94
5.3 物—场分析法·····	97
5.3.1 物—场分析简介·····	97
5.3.2 物—场分析的一般解法·····	99
5.3.3 物—场分析的应用·····	99
5.4 发明问题标准解法·····	100
5.4.1 标准解法的概述·····	100
5.4.2 标准解法的详解·····	101
5.4.3 标准解法的应用·····	116
5.5 发明问题解决算法(ARIZ)·····	118
5.5.1 ARIZ 概述·····	118
5.5.2 ARIZ 的求解步骤·····	118
5.5.3 发明 Meta-算法·····	128
5.6 创新案例·····	130
习 题·····	149
参考文献·····	151

第三篇 设计方法篇

第 6 章 优化设计方法 ·····	155
6.1 优化设计的基本知识·····	155
6.1.1 优化设计发展概述·····	155
6.1.2 优化设计的数学基础·····	156
6.1.3 优化设计的关键技术·····	159



6.1.4 优化设计的基本过程	161
6.2 优化设计问题分类	162
6.2.1 按照目标函数分类	162
6.2.2 按照设计变量分类	165
6.2.3 按照约束条件分类	170
6.3 优化设计问题的一般求解方法	171
6.3.1 满应力法	171
6.3.2 最速下降法	176
6.3.3 牛顿型方法	178
6.3.4 共轭方向法	180
6.3.5 惩罚函数法	182
6.3.6 随机方向搜索法	185
6.3.7 单纯形法	187
6.3.8 二次规划法	190
6.4 优化设计问题的智能求解方法	192
6.4.1 遗传算法	192
6.4.2 粒子群优化算法	195
6.4.3 蚁群算法	197
6.4.4 禁忌搜索算法	200
习 题	203
参考文献	204
第7章 机械动态设计	205
7.1 机械动态设计概述	205
7.1.1 机械动态设计的意义	205
7.1.2 机械动态设计的含义	205
7.1.3 机械动态设计的主要内容与关键技术	205
7.2 机械结构振动基础	206
7.2.1 机械振动的含义与分类	206
7.2.2 振动分析的一般步骤	208
7.2.3 单自由度系统的振动	209
7.2.4 多自由度系统的振动	214
7.2.5 非线性系统的振动	218
7.3 机械结构动力分析建模方法	220
7.3.1 概 述	220
7.3.2 有限元建模方法	221
7.3.3 实验模态分析建模方法	226
7.4 机械结构动力修改和动态优化设计	235
7.4.1 概 述	235
7.4.2 结构动力修改的准则	236



7.4.3 结构动力修改的动特性预测方法	239
7.4.4 结构动力修改的工程应用	242
7.5 振动的控制与利用	246
7.5.1 概 述	246
7.5.2 振源抑制	246
7.5.3 隔 振	247
7.5.4 减 振	249
7.5.5 振动的主动控制	252
7.5.6 振动的利用	254
习 题	256
参考文献	257
第 8 章 绿色设计与评价	258
8.1 绿色产品和绿色设计	259
8.1.1 绿色产品	259
8.1.2 绿色基准产品	260
8.1.3 绿色设计技术与市场	260
8.2 绿色设计与制造	262
8.2.1 绿色设计与传统设计	262
8.2.2 绿色设计的定义	263
8.2.3 绿色设计评价指标体系	266
8.2.4 产品类型和绿色设计决策	268
8.3 绿色设计与制造工具	270
8.3.1 非软件类工具	271
8.3.2 软件类工具	275
8.3.3 绿色设计与制造系统集成	279
习 题	281
参考文献	281

第一篇

产品设计篇

第 1 章 产品设计基础

1.1 概 述

设计是指人类有意识、有目的的创造性活动。它与人类的生产活动及生活紧密相关。人类在改造自然的历史长河中,一直从事着设计活动,通过成功的设计来满足文明社会的需要。人类生活在大自然和自身“设计”的世界中,从某种意义上讲,人类文明的历史,就是不断进行设计活动的历史。历史证明,人类文明的源泉就是创造,人类生活的本质就是创造,而设计的本质就是创造性的思维活动。

1.1.1 产品设计的产生背景

工业产品设计是伴随着工业革命的产生而出现的。18 世纪下半叶首先在英国爆发了工业革命,人类从此由手工业文明进入到机械工业文明的时代。

工业革命带来了工业文明,其核心是机械化的生产方式。旧有的手工作坊式的生产模式已经不能适应机械化大生产的要求,因此迫切需要产生一种新的产品生产方式。可以说,工业产品设计就是为适应这种新的生产方式而产生的。由工业产品设计所形成的标准化、合理化不仅改变了设计本身,也使机械化大生产得以飞速发展,但最初的产品设计仍带有传统产品的形式与风格。到了 19 世纪,产品设计中虽然运用了新技术、新材料,但是产品样式仍带有传统产品的形式与风格,与现代设计的概念相去甚远。

直到 20 世纪中期,设计仍被限定在比较狭窄的专业范围内,单一的学科知识很难解决专业范围内的设计问题。但从 20 世纪 60 代以来,由于各国经济的高速发展,特别是竞争的加剧,一些主要的工业发达国家采取措施加强设计工作,促进设计方法学的研究迅速发展,不同的国家已形成了各自的研究体系和风格,如德国的学者和工程技术人员着重研究设计的过程、步骤和规律;英美学派偏重分析创造性开发和计算机在设计中的应用;日本则充分利用国内电子技术和计算机的优势,在创造工程学、自动设计、价值工程方面做了不少工作。20 世纪 80 年代前后,中国在不断引进吸收国外研究成果的基础上,开展了设计方法的理论和应用研究,并取得了一系列成果。

1.1.2 产品设计的定义与内涵

什么是设计?至今人们仍有着不同的解释。在我国《现代汉语词典》中将设计一词解释为“在正式做某项工作之前,根据一定的目的与要求,预先制定方法、图样等”。国际工业设计协会(International Council of Societies of Industrial Design, ICSID)在 2006 年为设计给出了权威的定义:设计是一种创造性的思维活动,目的是在物品、过程、服务及它们在全生命周期中构成的系统之间建立起多方面的品质与联系。因此设计不仅是在人本主义基础上创新技术的构成要素,也是进行精神与文化交流过程中必不可少的关键点。

曾获诺贝尔经济学奖的世界著名科学家赫伯特·西蒙认为:设计是一种为了使我们生活的环境更适合生存的主观活动,设计是一种能使我们的要求、生产水平、市场供求和资本转化成对人类有利的结果和产品的办法。欧洲的一些学者则认为:设计是一条解决确实存在的



问题的必经之路,设计是为了达到某种特定要求或特殊目的,按照一定的顺序进行活动而制定的相应计划。

对于设计的理解,虽然存在着由于地域和文化的不同所引起的差异,但其设计的内涵和本质却是相同的,那就是设计是为了更好的生活而进行的一种具有创造性的活动和服务,是将人类的社会需求转化为技术手段或产品的过程。就设计者而言,设计是一种表达方式;就使用者而言,设计则是对一种需求的满足手段。

1.1.3 产品设计的目的与重要性

1. 产品设计目的

产品是为了满足人的需求而设计生产的。这是因为无论站在什么角度来研究产品设计,最终产品服务的主要对象都是人。

对设计者来说,产品的设计是为了满足消费者的各个层面的需求,无论是在实用功能、安全功能层面,还是在审美功能层面,其目的都始终围绕着最终消费者——人。

对生产者来说,产品的投入是为了产品在投入市场后经过销售环节进入消费者手中,从中赚取利润。虽然其目的不在产品本身,但是生产者的目的却是通过产品间接实现的。

对消费者来说,他们无疑是产品设计的直接使用者和产品设计成功与否的最终鉴定者。

对社会来说,产品设计要体现其可持续性和前瞻性。在产品的设计、生产过程中要减少对资源的浪费和对环境的污染。从社会角度看产品设计,社会是指由于共同的物质条件而互相联系起来的人群,因此,产品设计的需求主题是人类本身。

2. 产品设计的重要性

工程设计是为了满足人类社会日益增长的需要而进行的创造性劳动,它和生产、生活及其未来密切相关,所以人们对设计工作越来越重视。产品设计的重要性主要表现在以下几个方面:

(1) 设计直接决定了产品的功能与性能。产品的功能、造型、结构、质量、成本和可制造性、可维修性、报废后的处理以及人—机(产品)—环境关系等,原则上都是在产品设计阶段确定的,可以说产品的水平主要取决于设计水平。

(2) 设计对企业的生存和发展具有重大意义。产品生产是企业的中心任务,而产品的竞争力影响着企业的生存和发展。产品的竞争力主要在于它的性能和质量,也取决于其经济性。而这些因素都与设计密切相关。

(3) 设计直接关系人类的未来及社会发展。设计创新是把各种先进技术转化为生产力的一种手段,是先进生产力的代表;设计创新是推动产业发展和社会进步的强大动力。在人类社会的发展史上,每次产业结构的重大变革和带来的社会进步都伴随着一个或几个标志性的创新产品。

1.2 产品设计过程

设计过程具有自己特定的、共性的方法学过程。它决定着设计部门和设计人员从开始一项产品的设计到取得成功全过程的工作步骤和相应的思维主题。认识这一方法学进程将使设计思维有序化、全面化,避免遗漏应考虑的问题。这一进程并不是僵化的工作程序,而应根据设计任务的需要,灵活地向前推进;有些步骤变为次要,有些则成为重点工作内容。同时,进程中的每一个阶段都会通过评价形成修改意见,反馈到上游某一个阶段,整个过程有时会反复循环多次,这也是一项产品走向成熟的必然过程。



1.2.1 产品设计类型

产品设计一般可以分为5种类型:

1. 开发性设计(创新设计)

开发性设计是指在设计原理、设计方案全都未知的情况下,企业或者个人根据市场的需要或者突发的灵感以及对未来应用价值的预测,根据产品的总功能和约束条件,应用可行的新技术,进行创新构思,提出新的功能原理方案,完成产品的全新创造。这是一种完全创新的设计,如超越当前先进水平,或适应政策要求,或避开市场热点开发有新特色的、有希望成为新的热点的“冷门”产品。发明性产品属于开发性设计。

2. 接受订货开发设计

接受订货开发设计是根据用户订货要求所进行的开发设计。它常常是满足用户特殊需要的专用非标准设计。这时设计部门要承担一定的风险,所以必须进行慎重的论证,主要技术应在自己熟悉的业务领域内,大多数技术和所用零部件都应是成熟的,设计与制造周期、交货时间都应与自身的能力相适应。对使用还不熟悉的新技术要作充分的可行性论证,而且新技术的使用不宜太多。用户通常采用招标的方式寻求制造商,能否中标则取决于投标方的综合实力。

3. 适应性设计

适应性设计是指在工作原理保持不变的情况下,根据生产技术的发展和使用部门的要求,对现有产品系统功能及结构进行重新设计和更新改造,提高系统的性能和质量,使它适应某种附加要求。例如,汽车的电子式汽油喷射装置代替了原来的机械控制汽油喷射装置等。另外这种设计还包括对产品做局部变更或增设部件,使产品能更广泛地适应某种要求。

4. 变参数性设计

变参数性设计是指在工作原理和功能结构不变的情况下,只是变更现有产品的结构配置和尺寸,使之满足功率、速比等不同的工作要求。例如,对齿轮减速箱做系列设计,发动机做四缸、六缸,直列、V型等改型设计等。

5. 反求型设计

反求型设计是指按照国内外产品实物进行测绘。用实测手段获得所需参数和性能、材料和尺寸等;用软件直接分析了解产品和各部件的尺寸、结构和材料;用试制和试验掌握使用性能和工艺。

在工程实践中开发性设计目前所占比例不大,但开发性设计产品具有冲击旧产品、迅速占领市场的良好效果,因此,开发性设计通常效益高、风险大。

1.2.2 产品设计原则

产品开发应遵循以下原则。

1. 创新原则

设计本身就是创造性思维活动,只有大胆创新才能有所发明、有所创造。但是,当今的科学技术已经高度发展,创新往往只是在已有技术基础上的综合。有的新产品是根据别人研究试验结果设计的,有的则是博采众长,加以巧妙组合。因此,在继承的基础上创新是一条重要原则。

2. 效益原则

在可靠的前提下,力求做到经济合理,使产品“物美价廉”,才有较大的竞争力,创造较高的



技术经济效益和社会效益。也就是说,不仅要满足用户提出的功能要求,还要有效地节约能源,降低成本。

3. 可靠原则

产品设计力求技术上先进,但更要保证可靠性。无故障运行的时间长短是评价产品的重要指标,所以,产品要进行可靠性设计。

4. 审核原则

设计过程是一种设计信息加工、处理、分析、判断决策、修正的过程。为减少设计失误,实现高效、优质、经济的设计,必须对每一设计程序的信息随时进行审核,绝不允许有错误的信息流入下一道工序。实践证明,产品设计质量不合格的原因往往是审核不严,因此,适时而严格的审核是确保设计质量的一项重要原则。

1.2.3 产品设计过程

从产品设计角度出发,以机电产品为例对产品设计过程进行阐述,其他产品设计过程与其类似。机电产品设计过程有产品设计规划(阐明任务)、原理方案设计、技术设计和施工设计4个主要阶段。现代设计要求设计者以系统的、整体的思想来考虑设计过程中的综合技术问题。为了避免不必要的经济损失,开发机电产品时应该遵循一定的科学开发生产原则。下面详细阐述开发机电产品设计的一般步骤。

1. 产品设计规划阶段(阐明任务)

产品设计规划,就是决策开发新产品的设计任务,为新技术系统设定技术过程和边界,是一项创造性的工作。要在集约信息、市场调研预测的基础上,辨识社会的真正需求,进行可行性分析,提出可行性报告和合理的设计要求与设计参数。

2. 原理方案设计阶段

原理方案设计就是新产品的功能原理设计。用系统化设计方法将已确定的新产品总功能按层次分解为分功能直到功能元。用形态学矩阵方法求得各功能元的多个解,得到技术系统的多个功能原理解。经过必要的原理试验和评价决策,寻求其中的最优解,即新产品的最优原理方案,列表给出原理参数,并做出新产品的原理方案图。

3. 技术设计阶段

技术设计师把新产品的最优原理方案具体化。首先是总体设计,按照人一机一环境的合理要求,对产品各部分的位置、运动、控制等进行总体布局;然后同时进行实用化设计和商品化设计两条设计路线,分别经过结构设计(材料、尺寸等)和造型设计(美感、宜人性等)得到若干个结构方案和外观方案,再经过试验和评价,得到最优化结构方案和最优化造型方案;最终得出结构设计技术文件、总体布置草图、结构装配草图和造型设计技术文件、总体效果草图和外观构思模型等。

4. 施工设计阶段

施工设计是把技术设计文件的结果变成施工的技术文件。一般来说,要完成零件工作图、部件工作图、造型效果图、设计和使用说明书、设计和工艺文件等步骤。

以上是机电产品设计的4个阶段,应尽可能采用现代设计方法与技术实现CAD、CAPP、CAM一体化,从而大大减少工作量,加快设计进度,保证设计质量,少走弯路,减少返工浪费。图1-1给出了新产品设计一般进程的不同阶段、步骤、使用方法和指导理论等。

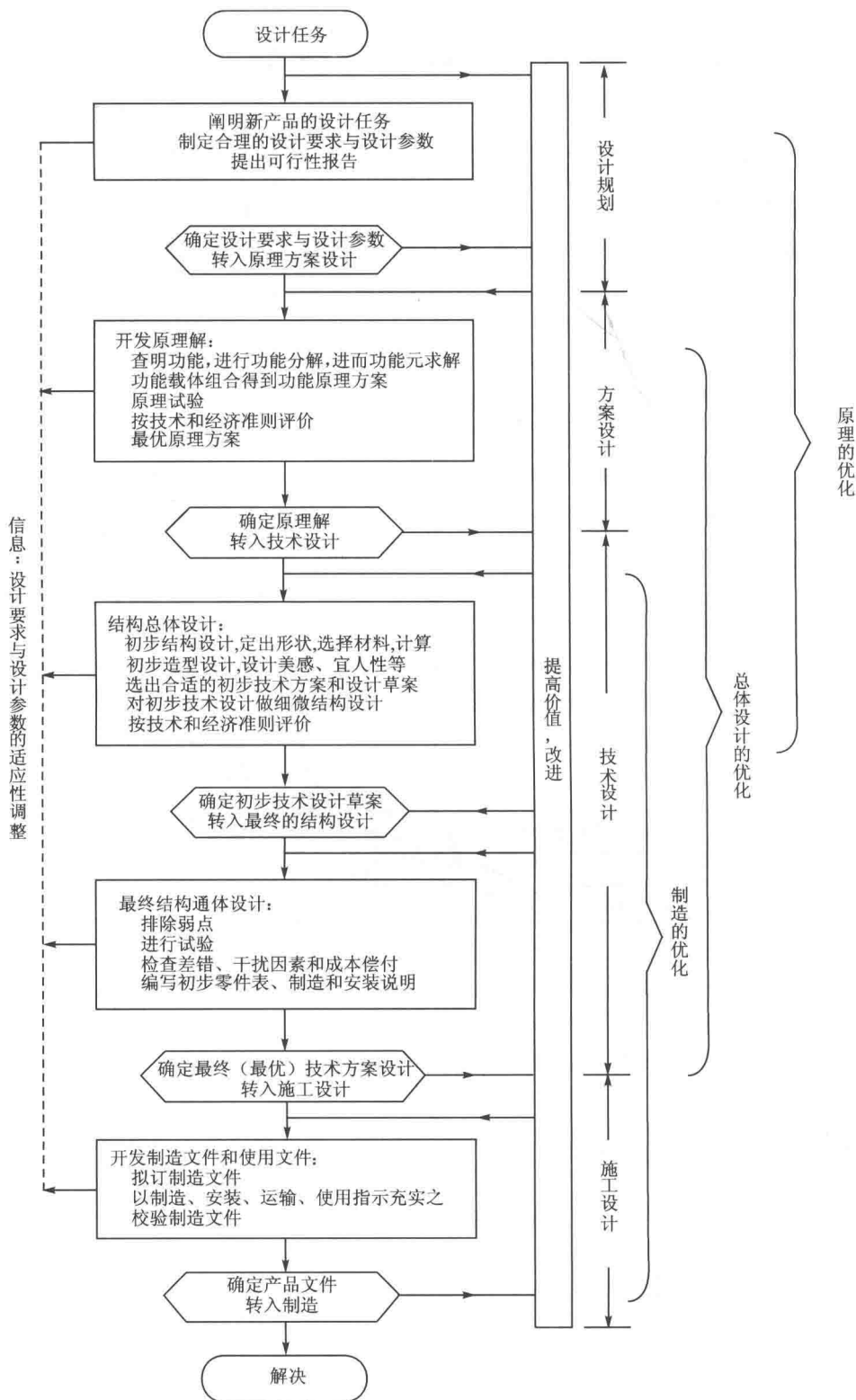


图 1-1 机械产品设计工作流程图