

# 现代设计理论

王启广 叶 平 主编

中国矿业大学出版社

## 内 容 简 介

本书着重介绍了工程实践中广泛应用的三大现代设计方法:优化设计方法、有限元分析方法、可靠性设计方法。本书尽量避免繁琐的理论论证和数学推导,力求体现现代设计方法的基本思想和基本理论,注重整体的思路与工程实际应用。对于目前其他现代设计理论及方法,本书也给予了介绍。本书体系完整,重点突出,内容丰富,通俗易懂。

本书可作为高等学校工科机械类、机电类及其他相近专业学生的教材,也可作为工程技术人员继续教育的培训教材,还可供有关工程技术人员及企业管理工作者参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代设计理论/王启广,叶平主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2005.8

ISBN 7 - 81107 - 085 - 5

I. 现… II. ①王…②叶… III. 机械设计—高等学校—教材 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 063812 号

书 名 现代设计理论

主 编 王启广 叶 平

责任编辑 耿东锋

责任校对 周俊平

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail [cumtpvip@cumtp.com](mailto:cumtpvip@cumtp.com)

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 12.75 字数 316 千字

版次印次 2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

定 价 24.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

随着科学技术的迅猛发展以及计算机技术的广泛应用,设计领域正进行一场深刻的变革,各种现代设计理论与方法不断涌现,设计方法更为科学化、系统化、完善化和先进化,使传统的设计方法已发展成为一门新兴的综合性、交叉性学科——现代设计方法。现代设计方法与技术的广泛应用,必将为我国的工业生产带来巨大的经济效益,提供更丰富、更安全、更方便、更环保的产品。

基于现代设计方法种类繁多、内容又十分广泛的特点,编者结合多年来从事教学与科研工作的经验,将本书的重点放在实践中应用十分广泛的三大类现代设计方法——优化设计方法、有限元分析方法和可靠性设计方法上。这三类方法,突出体现了现代设计方法与传统设计方法在思想方法上所发生的深刻变化,即设计最优化思想、高速度高精度分析思想与设计参数随机化的思想。本书着重介绍这些方法的基本思想、基本理论及解决实际问题的主要步骤、方法与手段。鉴于现代设计方法内容涉及面广,发展迅速,本书在第五章对其他现代设计方法进行了概况性的介绍,希望使读者开阔视野,并在有限的时间内,对现代设计方法有较全面的了解。

本书是在多次使用的教学讲义基础上编写的。在内容的组织上,强调知识的实用性、整体性、科学性和先进性,力求通俗易懂,深入浅出,尽量避免繁琐的理论论证和数学推算。本书除了适宜作为高等学校机械类、机电类及相关专业学生教学用书外,也可作为工程技术人员继续教育的培训教材,还可供有关工程技术人员及企业管理工作者参考使用。

本书绪论、第一章、第五章及附录由王启广编写,第二章由王启广、赵亮编写,第四章由王启广、陈世其编写,第三章由叶平编写。全书由王启广负责统稿。杜长龙教授对本书的编写给予了诸多指导,在此表示衷心的感谢!

限于编者的水平和经验,不当之处敬请读者指正。

编 者

2005年6月

## 目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 现代设计方法概述.....	1
第二节 设计中的系统科学方法.....	5
第三节 系统建模.....	7
第四节 现代设计技术特点.....	8
第二章 机械优化设计 .....	11
第一节 机械优化设计概论 .....	11
第二节 优化方法的数学基础 .....	17
第三节 一维搜索 .....	29
第四节 无约束优化方法 .....	37
第五节 约束优化方法 .....	59
第六节 优化技术应用 .....	77
复习思考题 .....	84
第三章 有限元法 .....	86
第一节 有限元法的基本概念 .....	86
第二节 平面问题的有限元法 .....	87
第三节 动力学分析有限元法.....	102
第四节 有限元建模方法.....	107
复习思考题.....	120
第四章 可靠性设计.....	122
第一节 概述.....	122
第二节 零部件可靠性设计.....	134
第三节 系统可靠性设计.....	150
第四节 故障树分析.....	158
复习思考题.....	166
第五章 现代设计方法发展前沿.....	168
第一节 创新设计.....	168
第二节 快速响应设计.....	171

---

第三节	智能设计·····	174
第四节	全生命周期设计·····	177
第五节	虚拟设计·····	178
第六节	并行设计·····	180
第七节	面向制造的设计·····	184
第八节	绿色设计·····	186
附录 1	标准正态分布积分表·····	191
附录 2	Matlab 基础知识·····	192
参考文献	·····	197

# 第一章 绪 论

## 第一节 现代设计方法概述

为了满足人类与社会的要求,将预定的目标通过人们创造性思维,经过一系列规划、分析和决策,形成载有相应的文字、数据、图形等信息的技术文件,以取得最满意的社会与经济效益,这就是设计。人类的设计活动从早期的直觉设计阶段开始,经历了经验设计阶段、半理论半经验设计阶段即所谓的传统设计阶段,发展至今。随着电子技术、计算机技术、网络技术的迅猛发展,信息时代的来临,人们的生活方式、工作方式和思维方式发生了巨大的改变,由此对设计方面产生了深远的影响。市场竞争的需要和各种新方法、新技术、新工艺、新材料的不断涌现,推动了设计方法和技术的进步,产品设计从传统的经验设计阶段进入现代设计阶段。

现代设计是传统设计的深入、丰富和完善,而非独立于传统设计的全新设计。虽然目前对现代设计尚无确切定义,但我们可以这样理解现代设计:它是以市场需求为驱动,以知识获取为中心,以现代设计思想、方法和现代技术手段为工具,考虑产品的整个生命周期和人、机、环境相容性等因素的设计。

### 一、现代设计手段

设计手段是人的设计思想借以实现的工具和技术。计算机技术、软件技术和数据库技术的发展对设计手段起到了变革性的作用,以计算机为工作平台的设计工具正在广泛取代传统的图板,计算机辅助设计正在成为现代设计的主要手段,它使设计效率、设计水平和设计质量得到全面提高。计算机辅助设计包括如下内容。

#### 1. 计算机辅助绘图

计算机辅助绘图的速度大大高于人工绘图,且电子图纸的修改、存储和管理方便,可明显提高设计效率和减轻人的劳动强度。

#### 2. 计算机辅助几何建模

计算机辅助几何建模就是在计算机内建立产品零件的实体模型或曲面模型,并实现零件的装配和干涉检查。几何建模是三维设计的主体。

#### 3. 工程分析与计算

大多现代设计方法都涉及复杂计算,这些计算通过人工或计算器无法完成。计算机通过各种计算机辅助设计(CAD)软件能使这些方法得以工程实现。

#### 4. 智能设计与专家系统

将人工智能、神经网络等技术引入工程设计并开发出具有专家指导功能的软件——专家系统,可以提高设计者的决策判断能力,加快设计速度,减少设计失误。

#### 5. 数据库管理系统

数据库是设计数据的集合。利用数据库管理系统可对设计数据快速、有序、合理地存

储、查询和控制,从而提高设计的水平和效率。

## 二、现代设计的特征

以计算机技术为核心是现代设计的主要特征。计算机技术的飞速发展对设计产生了巨大影响,表现为以下方面。

### 1. 设计手段的更新

传统设计以图板、直尺、铅笔等作为工具,这种设计手段效率低、劳动强度大。CAD技术的出现和发展,使用掉图板的“无纸设计”成为现代设计的主流,显著提高了设计效率。

### 2. 产品表示的改变

传统设计利用投影原理表示产品结构,这种二维表示数据单一,数据量小,不便于产品的进一步分析和制造。随着CAD技术的发展,三维“产品模型”(product model)越来越得到广泛应用。三维表示不仅包括反映产品形状和尺寸的几何信息,还可以包括分析、加工、材料、特性等数据,从而可直接用于分析和制造。因此计算机技术推动了产品表示从“二维”向“三维”的转变。

### 3. 设计方法的发展

一些先进的设计方法如有限元分析、优化、模态分析等都涉及大量复杂计算,计算机硬件和先进的软件技术是这些方法实施的保证。只有计算机技术的发展才能推动这些方法的进步和应用。同时,计算机技术也促进了一些新的设计方法的出现,如并行设计、虚拟设计、计算机仿真等。

### 4. 工作方式的变化

受设计手段的限制,传统设计过程采用串行方式进行,即设计任务按时序从一个环节传入下一个环节。随着数据库技术和网络技术的发展,并行设计正得到广泛应用。它要求设计小组(team)同时地、并行地参与设计,并最大限度地交流信息,以缩短设计周期及有助于将各种新思想、新技术、新方法融入到产品设计中。因此计算机技术促进了设计方式从“串行”到“并行”的变化。

### 5. 设计与制造一体化

存在于计算机内的产品模型可直接进入计算机辅助工艺设计(computer aided process planning, CAPP)系统进行工艺规划和NC编程,进而加工代码可直接传入NC机床、加工中心进行加工。产品模型加强了设计与制造两个环节的连接,提高了产品开发的效率。

### 6. 管理水平的提高

产品设计是一个复杂的系统工程,设计过程中涉及大量设计数据和设计行为的管理。数据库技术的发展改变了传统的手工管理模式,各种管理信息系统(management information system, MIS)、产品数据管理(product data management, PDM)系统的广泛应用大大提高了设计的管理水平,保证了设计过程的高效、协同和安全。

### 7. 组织模式的开放

网络技术的发展加快了数据通信速度,缩短了企业之间的距离。传统的局限于企业内部的封闭设计正在变为不受行政隶属关系约束的、多企业共同参与的异地设计。为完成一种设计任务形成的虚拟企业或动态联盟将实现优势互补和资源共享,极大地提高了设计效率和水平。

受科学技术发展水平的限制,传统设计是以生产经验为基础,以运用力学和数学形成的

计算公式、经验公式、图表、手册等作为依据进行的。随着理论研究的深入,许多工程现象不断升华和总结为揭示事物内在规律和本质的理论,如摩擦学理论、模态分析理论、可靠性理论、疲劳理论、润滑理论等。现代设计方法是基于理论形成的方法,利用这种方法指导设计可减小经验设计的盲目性和随意性,提高设计的主动性、科学性和准确性。因此,现代设计是以理论指导为主、经验为辅的一种设计。

### 三、现代设计原则

设计原则是设计产品应满足要求的条件,也是对设计行为的约束。受设计水平、观念、体制等限制,传统设计所考虑的原则,着眼于产品的功能和技术范畴。而设计的影响贯穿产品整个生命周期,所以设计原则必须面向生命周期内的各个阶段。现代设计原则是传统设计原则的扩充和完善,两者并无本质区别,可归纳为以下几类。

#### 1. 功能满足原则

产品设计的目的是构造能够实现规定功能的产品。如果产品不具备要求的功能,产品设计就失去价值。因此满足功能是各类产品设计的必要原则。

#### 2. 质量保障原则

保证质量是产品设计的重要原则。产品质量主要由性能和可靠性决定,因此这类原则主要包括:

(1) 性能指标:指产品的各类技术指标,如机床加工精度、传动系统运动精度,电视机分辨率等。先进的技术指标是实现高质量产品的前提。

(2) 可靠性:指产品在规定的条件和规定时间内完成规定功能的能力。产品只有可靠的性能才有实用价值,因此性能的发挥依赖于可靠性。

(3) 强度原则:要求产品零件具有抵抗整体断裂、塑性变形和某些表面损伤的能力。

(4) 刚度原则:要求外载作用下产品变形在规定的弹性变形之内。

(5) 稳定性:指产品在外载作用下能够恢复其平衡的特性。

(6) 抗磨损性:要求零件在规定时间内材料的磨损量在规定值以内。

(7) 抗腐蚀性:要求产品具有在恶劣环境下不被周围介质侵蚀的特征。

(8) 抗蠕变性:要求高温环境工作的产品不发生蠕变或蠕变变形在规定值以内。

(9) 动态特性:指在动载荷作用下产品具有良好的抗振特性,以保证产品的平稳和低噪声运行。

(10) 平衡特性:指旋转产品具有良好的静平衡和动平衡特性。

(11) 热特性:保证产品具有要求的温度大小、温度分布和热流状态,以及热应力、热变形在规定值以内。

#### 3. 工艺优良原则

工艺优良原则是指设计能够且容易通过生产过程实现,它包括:

(1) 可制造性:指利用现有设备能够制造出满足精度等要求的零件,且制造成本低,效率高。

(2) 可装配性:指零件能够装配成满足装配精度要求的部件和整机,且装配成本低,效率高。

(3) 可测试性:指产品能够且容易通过适当方法进行有关测试,以评估设计、制造和装配的质量。

#### 4. 经济合理原则

它要求产品具有较低的开发成本和使用费用。

#### 5. 社会使用原则

社会使用原则即考虑产品投放市场后的表现行为,包括:

(1) 环境友好性:保证产品产生尽可能少的废水、废气、噪声、射线等,符合环保法规,对生态环境破坏最小。环境友好性是可持续发展战略在设计中的重要体现。

(2) 环境适应性:适应使用环境的湿度、温度、载荷、振动等特殊条件。

(3) 人机友好性:满足使用者生理、心理等方面要求,使产品外形美观,色彩宜人,操作简单、方便、舒适。

(4) 可维修性:使产品能够且易于维修,维修的停机时间、费用、复杂性、人员要求和差错尽可能最小。

(5) 安全性:保证不对人的生命财产造成危害。

(6) 可安装性:保证产品使用前安装容易、可靠,且安装费用最小。

(7) 可拆卸性:考虑产品的材料回收和零部件的重新使用。

(8) 可回收性:考虑产品报废及回收方式。

上面分类介绍了各种原则,有些归类并不十分严格。设计时应根据产品特点选择部分原则,而在选择的原则中又分主要和次要原则。根据所选主要原则的不同,目前已形成许多针对性设计方法,如面向制造和装配的设计(DFMA)、面向环境的设计(DFE)、面向拆卸的设计(DFD)等。

### 四、现代设计理论与方法

设计理论是对产品设计原理和机理的科学总结。设计方法是使产品满足要求以及判断产品是否满足设计原则的依据。现代设计方法是基于设计理论形成的,因而更具科学性和逻辑性。实质上,现代设计方法是科学方法论在设计中的应用,是设计领域中发展起来的一门新兴的多元交叉学科。它融合了信息技术、计算机技术、知识工程和管理科学等领域的知识,因此现代设计方法包含的内容十分广泛。由于一些方法还在不断地完善和发展中,所以现代设计方法还不能完全取代传统设计方法,一些行之有效的经验方法目前仍在广泛使用,它们仍是现代设计方法的重要组成。

设计方法分为适合不同类型产品设计的一般方法和面向特殊产品的具体方法。常见的一般方法包括:

(1) 系统分析方法。

(2) 价值工程方法。

(3) 技术经济预测方法。

(4) 有限元法与边界元法。

(5) 最优化设计法。

(6) 可靠性设计法。

(7) 动态设计法。

(8) 绿色设计方法。

(9) 并行设计方法。

(10) 虚拟设计方法。

- (11) 反求设计法。
- (12) 稳健设计方法。
- (13) 机电一体化设计法。
- (14) 外观设计方法。
- (15) 计算机仿真与动态模拟方法。
- (16) 抗磨损设计法。
- (17) 抗疲劳设计法。
- (18) 防腐蚀设计法。
- (19) 现代测试与信号分析技术。
- (20) 理论与实验模态分析方法。
- (21) 故障诊断方法。
- (22) 模块化设计方法。
- (23) 相似设计和模型试验方法。
- (24) 功能分析设计方法。
- (25) 创造性分析设计方法。
- (26) 智能分析设计方法。
- (27) 离散分析设计方法。
- (28) 模糊分析设计方法。
- (29) 物元分析设计方法。
- (30) 网络分析设计方法。
- (31) 人工神经网络分析设计方法。
- (32) 工程遗传分析设计方法。
- (33) 下一代设计制造系统分析设计方法。

现代设计方法把设计对象看做一个系统,同时考虑系统与外界的联系,用系统工程的概念进行分析和综合,力求系统整体最优。现代设计方法强调创造能力开发和充分发挥人员的创造性,重视产品的原理方案的设计、开发和创新;强调综合考虑与分析市场需求、设计、生产、管理、使用和销售等各方面因素;强调综合运用优化设计、系统工程、可靠性理论、价值工程、计算机技术等学科知识,探索多种解决设计问题的科学途径。总之,现代设计方法把经验的、类比的设计观点变成逻辑的、推理的、系统的设计观点,采用动态的、多变量的、多方案的、扩散性的设计思维方式,具有系统性、创造性、综合性和程式性的特点。

## 第二节 设计中的系统科学方法

### 一、系统论

系统论以系统为对象,考察和研究其整体与部分之间相互作用和相互制约的关系,并采用最优化方法求得系统的最佳结果。系统论的出现和发展,为信息科学提供了重要理论基础,也推动了技术科学中的系统工程飞速前进。

虽然各种系统千差万别,但它们都有三个共同特征:都是由若干部分以一定的结构相互联系而成的有机整体;这些相互联系的整体可以分解为若干基本部分;这一整体具有目的

性。我们称这种由相互作用、相互依赖的若干部分组成,并具有确定功能的有机整体为系统。为了对系统进行深入的研究,人们往往根据不同的需要,从不同的角度,对客观存在着的各种不同形态的系统进行分类。

一般系统论的主题是阐述对于系统普遍有效的原理,这些原理主要反映在系统与部分、部分与部分、结构与功能以及系统与环境、系统与时间等关系上,如系统整体性原理、动态相关性原理、层次等级性原理、系统有序性原理。

如果说系统的基本概念和原理主要是从理论上研究系统,以解决对一般系统的性质和规律的认识问题,那么,系统方法则主要是从应用上研究系统,以解决对具体系统的认识和管理问题。可以说,系统方法是系统理论的实际应用,它是系统科学方法中的核心部分,也是应用最广泛的现代科学方法之一。系统方法既包括运用系统概念、原理来分析和认识事物的一般方法,也包括用以处理具体系统问题的系统分析和系统工程方法。这两个方面是紧密联系的统一整体,前者是后者的方法论基础,后者是前者在使用和实施中的具体表现。

所谓一般系统方法就是按照客观事物本身的系统性,始终以整体与部分、部分与部分、整体与环境的相互联系、相互作用、相互制约的关系中,综合地考察研究对象,以达到最佳处理问题的目的。

系统分析是一般系统方法在科学决策中的具体应用,是在一般系统方法的指导下,对某些具体系统进行数量分析的决策方法。系统分析的要素,亦即系统分析的主要项目,包括目的、可行方案、费用、效益、模型、评价标准等。系统分析的一般过程通常为:提出问题,明确目标,收集资料,分析问题,建立模型,优选方案。

系统工程是一门对各种系统提出一整套分析和处理的科学方法的组织管理技术。对于分析和处理不同系统的各类系统工程,可以找到一套具有共同性的思路、程序和方法,这便是系统工程方法。系统工程方法是一般系统方法在组织管理中的具体应用。如果说系统分析属于系统工程的准备阶段或开始阶段,则系统工程包括组织管理的全过程。

系统工程的理论基础是运筹学和数学、计算机科学和计算技术。它在具体处理问题时,把组织和管理的对象视为系统,运用概率、统计、运筹学、模拟等方法,经过分析、推理、判断、综合,建成某种系统模型,通过计算机进行运算模拟,进而获取最佳方案,求得系统整体的最优规划、最优管理和最优控制。

## 二、设计方法学

自 20 世纪 60 年代起,世界发达工业国家便开始重视设计理论与方法的系统研究。德国注重设计模式的研究,即注重研究设计的过程、步骤和规律,对设计过程进行系统化的逻辑分析,并将成熟的设计模式、解法等编成规范,供设计人员参考,使设计的方法步骤规范化。美、英等国则注重创造性设计的研究,在优化、价值工程、可靠性设计和计算机辅助设计方面做了许多工作。日本则在开发创造工程学和自动化设计的同时,强调工业设计。尽管各国在研究内容上有所不同,但共同的特点都是总结设计规律,启发创造性,采用现代化的先进理论和方法,使设计过程自动化、合理化,目的是为了提高设计水平和质量,设计出更好的产品,以满足社会日益发展的需要。

各国在设计方法研究过程中,发展了设计方法学(Design Methodology),从而使它成为现代设计方法的一个重要内容。设计方法学是研究产品设计的程序、规律及设计中思维和工作方法的一门综合性学科。设计方法学的研究内容包括:

(1) 研究设计过程,各阶段的任务与特点,寻求符合设计规律的设计程序。

(2) 研究设计中解决问题的合理逻辑步骤和应遵循的工作原则。

(3) 分析设计中的思维规律,研究设计人员科学的创造性的思维方法和技术。

(4) 研究各种类型设计(如开发型设计、变型设计、反求设计等)的特点以及系统工程、创造工程、价值工程、优化工程、可靠性工程、相似工程、人机工程、工业美学等现代设计理论与方法在设计中的应用。

(5) 研究设计信息库(设计目录)的建立和应用(如各种知识、科学技术原理、技术成果、专利等信息的表达与储存——知识库,各种操作、程序、技法、方法的合理表达与储存——方法库,等等)。

(6) 研究设计步骤、理论、方法如何结合计算机等工具的运用,进一步促进设计自动化的实现。

由此可见,设计方法学是在深入研究设计过程本质的基础上,以系统论的观点研究设计过程(战略问题)和具体设计方法(战术问题)的科学。设计方法学研究现代理论与方法在设计领域中的应用,本身也构成现代科技发展的一个组成部分。设计方法学的研究在总结规律性、启发创造性的基础上促进设计中的科学理论、合理方法、先进手段的综合运用。

### 三、设计系统

设计系统是一种信息处理系统,输入的是设计要求和约束条件信息,设计者运用一定的知识和方法通过计算机、试验设备等工具进行设计,最后输出的是方案、图纸、程序、文件等设计结果。信息和反馈信息的增加,通过设计者的合理处理,将使设计结果更趋完善。

从系統工程的观点分析,设计系统是一个由时间维、逻辑维和方法维组成的三维系统。其中,时间维是指设计过程的各工作阶段,对产品的设计过程一般分为四个阶段:产品规划阶段、原理方案设计阶段、技术设计阶段和施工设计阶段;逻辑维是指解决问题的逻辑步骤;方法维是指列出设计过程中的思维方法和工作方法。设计过程中的每一个行为都反映为这个三维空间中的一个点。从这三个方面,我们可以深入分析和研究设计系统的规律。

设计中解决问题的合理逻辑步骤是:分析—综合—评价—决策。分析的目的是明确任务的本质要求;综合是在一定条件下对问题(未知系统)探寻解法,可采取抽象、发散、搜索等方法,寻求尽可能多的创造性解法,在多解的基础上找到较理想的最佳解;评价是收敛、筛选的过程,用科学的方法按评价准则对多种方案进行技术经济评定和比较,同时针对方案的弱点进行调整和优化,直至得到比较满意的结果;决策是在评价的基础上对已定的目标找出问题的最佳解法。通过分析—综合—评价—决策的逻辑过程能科学合理地解决设计中的问题。在设计过程的各阶段只有反复多次地运用这种逻辑方法,才有可能得到较理想的结果。

## 第三节 系统建模

在规划、分析、设计系统时,需要定性或定量地了解系统的功能和结构,并对系统的行为进行充分的探讨。例如,在汽车、飞机、桥梁等领域的设计过程中,自古就有制作实物模型或缩尺模型来进行试验的方法。但是,这种方法并不是总能实现的。由于计算机的飞速发展与普及,产生了一种用数学模型来准确表达系统特征,即用计算机进行试验的抽象模型方法。这种方法成本低,无危险,而且可以不必停止或破坏运行中的系统,可在极短时间内从

某一角度研究系统的行为。在现代设计方法中,普遍采用这种方法。

模型描述的是现实系统及其过程某一方面的本质属性,它是对研究对象的一种抽象描述。因此,模型不但要反映实际,而且还要高于实际。模型是由一些与分析对象有关的主要因素构成的,它反映了这些因素之间的关系。模型可将复杂的问题简化为易于处理的形式,同时还可以用简便的方式,在决策之前预测出它的结果,因此,模型是系统分析的主要工具,模型的建立是系统分析过程中的重要环节。

常用的模型有实物模型、模拟模型、图式模型和数学模型。数学模型是用代数方程、差分方程、微分方程、逻辑表达式等数学形式描述系统行为的模型。从对象系统的特性角度,数学模型可分为静态模型和动态模型、确定性模型和随机性模型、线性模型和非线性模型、连续时间模型和离散时间模型、微观模型和宏观模型。从建模的目的角度,系统模型可分为功能模型、预测模型、规划模型、评价模型。从系统涉及领域的角度,系统模型可分为经济模型、管理模型、社会模型、军事模型、能源模型、人口模型、生态模型等。

在系统工程中,把建立准确描述系统特征和行为的数学模型等抽象模型的过程称为建模,即从看起来杂乱无章的实际工程问题中,抽象出恰当的数学关系。这是一个对实际对象的信息进行提炼、分析、归纳、翻译的过程,是一个归纳总结与演绎推理相结合的过程。由于实际工程系统的规模和复杂程度的不同,建模的难易程度也有所不同。

因此,建模时应注意以下几点:

(1) 明确目的:首先要明确建模的目的,即使是同一个系统,研究目的不同,建立的模型也不同。例如,设计飞机时,如果目的在于研究飞行性能,那么建模时需要选择适于流体力学计算的外形;而以结构强度为研究目的时,则需要选择适于结构力学计算的模型。

(2) 确定组成要素:必须确定对象系统模型中的最小单位的组成要素,使之与研究目的相一致。根据所选择组成要素的数量,模型可以简单也可以复杂。通常模型的精度和模型的简单程度互为矛盾。不论精度多高,如果模型过于复杂也难以使用,反之,如果模型简单但精度差也不能采用。这就需要在确定组成要素时兼顾这两方面的要求。

(3) 验证模型:模型建立后需验证其精度。只满足建模时所用数据的模型是毫无意义的。模型必须高精度地满足其他各种试验数据。当验证结果不理想时,要重新探讨建模时确定的假设和假说,修改模型中采纳的组成要素和模型结构,调整模型的参数,通过这些手段来修正模型。另外在验证模型时,除了验证精度之外还要注意确定模型的适用范围。

建模是实现现代设计方法的桥梁,是系统工程的起点。掌握建模的基本思想与方法是我们学好现代设计方法的基础。

## 第四节 现代设计技术特点

归纳起来,现代设计技术具有如下特点。

### 1. 设计范畴扩展化

传统设计只限于产品设计,现代设计则将产品设计向前扩展到产品规划,甚至用户需求分析;向后扩展到工艺设计,使产品规划、产品设计、工艺设计形成一个有机整体。另外,设计范畴的扩展还体现在面向“X”的设计技术,即在设计过程中同时考虑制造、维修、价格、包装发运、回收、质量等因素。

## 2. 设计手段计算机化

传统手工设计正在被计算机辅助设计代替。计算机在设计中的应用已从早期的辅助分析计算和辅助绘图,发展到现在的优化设计、并行设计、三维建模、设计过程管理、设计制造一体化、仿真和虚拟制造等。特别是网络和数据库技术在设计中的应用,加快了设计进程,提高了设计质量,方便了与其他部门或协作企业的信息交换。

## 3. 设计过程并行化

与产品有关各种过程的并行交叉进行,可以减少修改工作量,有利于加快设计进程,提高设计质量。又由于并行设计技术要求团队工作精神,要求各方面专家协同工作,因此有利于得到整体最优解。

## 4. 设计过程智能化

在传统设计过程中,一切创造性的设计都需要设计人员来完成。在现代设计中,可以借助人工智能和专家系统技术,由计算机完成一部分原来必须由设计者进行的创造性工作。

## 5. 设计手段拟实化

在传统设计过程中,产品和零件的外观形状,只有在制造后才能看到。由于三维造型技术、仿真和虚拟制造技术以及快速原形技术的出现,使得在零件被制造前就能够看到其形状,可以改进设计的效果。

## 6. 分析手段精确化

传统设计中,认为载荷、应力是集成的,依靠加大安全系数来提高可靠性。但在实际中,载荷、应力往往是分布式的,并且提高安全系数并不总能提高可靠性。现代设计则考虑载荷、应力的分布特性,利用有限元等功能强大的分析工具,准确模拟系统的真实工作情况,得到符合实际的最优解。现代设计还运用概率论、统计学方法进行产品的可靠性设计。

## 7. 多种手段综合应用

现代设计利用计算机,可以将各种不同目的的设计方法、各种不同的设计手段综合起来,以求得系统的整体最优解。

## 8. 强调设计的逻辑性和系统性

传统设计采用经验法和类比法,现代设计强调设计的逻辑性和系统性。例如,设计方法学中的功能分析法,以“功能原理结构”框架为模型,从抽象到具体,通过框架的横向变异和纵向组合,运用“设计目录”来获得多种设计方案,再通过评比和优化,最终选出最佳方案。

## 9. 动态多变量优化

传统设计过程由于受手段的限制,一般只能进行静态分析。现代设计可以考虑载荷谱、负载率等随机变量,进行动态多变量优化设计。

## 10. 强调产品环保性

随着人们对环境问题的重视,要求环境保护的呼声越来越高,这就要求设计出绿色产品,使产品运行过程中污染少,对人体危害小。

## 11. 强调产品宜人性

现代设计除强调产品的内在质量外,还特别强调产品的外观质量,如美观性、时代性、艺术性等,使产品造型具有艺术感染力,令使用者心情舒畅、愉快,满足使用者的审美要求。

## 12. 强调用户参与

用户是产品消费者,仅靠市场调研的结果并不能完全反映用户的需求,所以现代设计强

调用户参与设计过程,如此设计的产品才能反映用户需求,取得用户的最大满意。

### 13. 强调设计阶段质量控制

现代质量控制理论认为,产品质量首先是设计出来的,其次才是制造出来的,所以应特别重视设计阶段质量控制,避免设计出来的产品在质量上先天不足。

### 14. 设计制造一体化

传统的设计和制造过程是分离的,从设计到制造要经过好几个过程,往往会造成信息的“误解”;现代设计强调设计、制造过程的一体化和并行化,强调从设计信息到制造信息的顺畅传递、迅速反馈,设计和制造采用统一的数据模型。

### 15. 产品全寿命周期最优化

现代设计强调从市场调研、用户要求,到产品规划、产品设计、工艺设计、制造过程、质量控制、成本核算、销售价格、包装运输、售后服务、维修保养、报废处理、回收再利用等产品全寿命周期的综合最优化。

## 第二章 机械优化设计

### 第一节 机械优化设计概论

一般工程设计问题都存在许多种可能的设计方案。人们在进行设计工作时,总是力求从各种可能方案中选择较好的方案,或者说是优化的方案。

在常规的工程设计中,由于设计手段和设计方法的限制,设计者不可能在一次设计中得到多种方案,也不可能进行多方案的分析比较,更不可能得到最佳的设计方案。随着计算机的发展和普及,以计算机为基础的数值计算方法的成熟和应用,为工程问题的优化设计提供了先进的手段和方法,这就是最优化设计方法。

所谓最优化设计就是借助最优化数值计算方法和计算机技术,求取工程问题的最优化方案。进行最优化设计时,首先将实际问题加以数学描述,形成一组由数学表达式组成的数学模型,然后选择一种最优化数值计算方法和计算机程序,在计算机上运算求解,得到一组最佳的设计参数。这组设计参数就是设计的最优解。

数学模型是对实际问题的数学描述和概括,是进行优化设计的基础。因此,根据设计问题的具体要求和条件建立完备的数学模型是关系优化设计成败的关键。这是因为优化问题的计算求解完全是围绕数学模型进行的。也就是说,优化计算所得的最优解实际上只是数学模型的最优解。此解是否满足实际问题的要求,是否就是实际问题的最优解,完全取决于数学模型与实际问题的符合程度。

工程设计问题通常是相当复杂的。从实际问题中抽象出正确的数学模型,要求对实际问题及其相关理论和知识有深入的了解,是工程设计人员进行优化设计的主要任务。而求解这个数学模型的最优化方法,属于计算数学和应用数学的范畴,是工程设计的一种工具,现已有了较为成熟的各种算法和通用的计算机程序。对于这部分内容,工程设计者需要掌握的是:

- (1) 懂得这些算法程序的基本原理;
- (2) 能够选择合适的优化算法程序;
- (3) 熟悉使用通用优化设计程序并进行编制专用的优化设计程序,以解决各种类型的优化设计问题。

#### 一、优化设计的数学模型

下面通过简单的优化设计实例,说明数学模型的一般形式及其有关的基本概念。实例虽然简单,但却具有一定的代表性。

**例 2-1** 有一块边长为 6 m 的正方形铝板,四角各裁去一个小方块,做成一个无盖的容器。试确定裁去的 4 个小方块的边长,以使做成的容器具有最大的容积。

**解** 设裁去的 4 个小方块的边长为  $x$ ,则容器容积可表示成函数  $f(x) = x(6 - 2x)^2$ 。于是,问题可描述为

求变量

$$x$$

使函数

$$f(x) = x(6 - 2x)^2 \text{ 极大化}$$

这就是此问题的数学模型。其中,  $x$  称为设计变量,  $f(x)$  称为目标函数。由于目标函数是设计变量的一元三次函数, 且没有附加的约束条件, 故此问题属一元非线性无约束优化设计问题。根据一元函数的极值条件, 令  $f'(x) = 0$ , 解得极值点和极值分别为  $x = 1, f(x) = 16$ 。记作  $x^* = 1, f^* = 16$ , 称为该设计问题的最优解。

例 2-2 某工厂生产甲、乙两种产品。生产每种产品所需的材料、工时、电力和可获得的利润, 以及能够提供的材料、工时和电力见表 2-1。试确定两种产品每天的产量, 以使每天可能获得的利润最大。

表 2-1 生产条件与提供数据

产品	材料/kg	工时/h	电力/kW·h	利润/元
甲	9	3	4	60
乙	4	10	5	120
供应量	360	300	200	

解 这是一个生产计划问题, 可归结为既满足各项生产条件, 又使每天所能获得的利润达到最大的优化设计问题。

设每天生产甲产品  $x_1$  件, 乙产品  $x_2$  件, 每天获得的利润可用函数  $f(x_1, x_2)$  表示, 即

$$f(x_1, x_2) = 60x_1 + 120x_2$$

每天实际消耗的材料、工时和电力可分别用函数  $g_1(x_1, x_2)$ 、 $g_2(x_1, x_2)$  和  $g_3(x_1, x_2)$  表示, 即

$$g_1(x_1, x_2) = 9x_1 + 4x_2$$

$$g_2(x_1, x_2) = 3x_1 + 10x_2$$

$$g_3(x_1, x_2) = 4x_1 + 5x_2$$

于是问题归结为

求变量

$$x_1, x_2$$

使函数

$$f(x_1, x_2) = 60x_1 + 120x_2 \text{ 极大化}$$

满足条件:

$$g_1(x_1, x_2) = 9x_1 + 4x_2 \leq 360$$

$$g_2(x_1, x_2) = 3x_1 + 10x_2 \leq 300$$

$$g_3(x_1, x_2) = 4x_1 + 5x_2 \leq 200$$

$$g_4(x_1, x_2) = x_1 \geq 0$$

$$g_5(x_1, x_2) = x_2 \geq 0$$

这就是该设计问题的数学模型。其中,  $f(x_1, x_2)$  代表设计目标, 称为目标函数;  $g_u(x_1, x_2)$  ( $u = 1, 2, \dots, 5$ ) 代表 5 个已知的生产指标, 称为约束函数; 5 个不等式代表 5 个生产条件, 称为约束条件。由于目标函数和所有约束函数均为设计变量的线性函数, 故此问题属于线性约束优化问题。显然, 这样的问题无法直接利用极值条件求解。

例 2-3 承受纯转矩的空心传动轴, 已知传递的转矩为  $T$ , 见图 2-1。试确定此传动轴的内、外径, 以使其用料最省。