

# 现代机械优化设计方法

梁尚明 殷国富 主编

段阳 李华 蒋立茂 张均富 参加编写



化学工业出版社  
工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

现代机械优化设计方法/梁尚明, 殷国富主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 5  
ISBN 7-5025-7005-5

I. 现… II. ①梁…②殷… III. 机械设计-最佳化  
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 038447 号

---

现代机械优化设计方法

梁尚明 殷国富 主编

段阳 李华 蒋立茂 张均富 参加编写

责任编辑: 周国庆 李玉晖

文字编辑: 闫敏

责任校对: 顾淑云 李军

封面设计: 于兵

\*

化学工业出版社 出版发行  
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 483 千字

2005 年 7 月第 1 版 2005 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7005-5

定 价: 39.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

优化设计是一种现代设计方法，其基本思想是：根据一般的设计理论、设计方法，遵循设计规范和国家标准等，把工程设计问题按实际需要转化成数学模型，然后应用优化技术和计算机计算技术从众多可用设计方案中找出最优的设计方案或尽可能完善的设计结果。可见，优化设计技术对于提高产品设计水平、改进产品质量、推进计算机辅助设计具有重要作用。因此，学习和应用优化设计方法是非常有意义的。

模糊数学是一门新兴的数学学科。它的诞生和发展对许多领域，特别是工程领域产生了很大的影响，并已广泛应用于工程技术、国防军事技术、系统控制、交通运输、经济管理、社会科学等领域。模糊数学的出现使人们对工程领域中普遍存在的模糊性和模糊性现象的认识越来越深入，不仅如此，模糊数学也正好是解决这些模糊性问题的有效工具。将模糊数学与优化方法相结合产生的模糊优化方法应用于产品的设计，可以充分考虑设计中客观存在的模糊因素，使优化设计的结果更趋合理、更符合实际。

与模糊优化方法一样，遗传算法也是一种现代设计方法。它是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法。它在寻求全局最优解方面具有高效性。

本书系统地介绍了现代机械优化设计方法。首先介绍了普通优化方法的基本概念、基本原理和常用优化方法，然后介绍了机械模糊优化设计的基础知识、基本原理和基本方法，最后介绍了遗传算法以及运用遗传算法进行机械优化设计的方法。为了便于读者学习和使用现代机械优化设计方法，本书内容的编排由浅入深、循序渐进，充分体现现代设计思想和理念，坚持理论联系实际的原则，不仅给出了许多应用实例，而且最后一章还介绍了 MATLAB 软件在优化设计中的使用方法。

本书部分内容是作者多年来在新型传动及现代设计方法的研究与应用方面的学术成果。

参加本书编写的有，主编：梁尚明（四川大学）、殷国富（四川大学）；参编：段阳（四川大学）、蒋立茂（四川省农业机械研究设计院）、李华（四川大学）。其中，前言、第 2 章、第 3 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章由梁尚明编写，第 1 章、第 11 章由殷国富编写，第 4 章、第 5 章由段阳编写，第 6 章、第 7 章由蒋立茂、李华、段阳、梁尚明编写。参加本书编写的还有西华大学的张均富老师。全书由梁尚明统稿。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中不妥、疏漏和错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2005 年 2 月

于四川大学

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 机械优化设计的含义 .....	1
1.2 优化设计与传统设计的比较 .....	2
1.3 优化设计在 CAD 系统中的作用 .....	2
1.4 机械优化设计发展概况 .....	3
1.5 优化设计方法的工程应用领域 .....	4
1.6 现代机械优化设计的发展趋势 .....	5
第 2 章 机械优化设计的基本概念和数学模型 .....	8
2.1 优化问题的实例 .....	8
2.2 机械优化设计的数学模型 .....	10
2.3 优化问题分类和优化方法简介 .....	21
2.4 优化的几何解释 .....	23
第 3 章 优化设计的基础理论 .....	26
3.1 函数的泰勒 (Taylor) 表达式 .....	26
3.2 二次型与正定矩阵 .....	28
3.3 函数的等值面或线 .....	29
3.4 函数的最速下降方向 .....	30
3.5 凸函数 .....	34
3.6 约束函数的性质 .....	36
3.7 最优解与最优解条件 .....	37
3.8 优化设计的数值解法与收敛准则 .....	44
第 4 章 一维优化方法 .....	48
4.1 确定初始区间的进退法 .....	48
4.2 黄金分割法 (Golden Section Method) .....	50
4.3 牛顿法 (Newton's Method) .....	53
4.4 二次插值法 (Quadratic Interpolation Method) .....	54
第 5 章 无约束多维优化方法 .....	58

5.1	梯度法 (Gradient Method)	58
5.2	共轭梯度法	62
5.3	牛顿法	69
5.4	变尺度法 (Variable Metric Method)	72
5.5	坐标轮换法 (Cyclic Coordinate Method)	79
5.6	单纯形法 (Simplex Method)	82
5.7	鲍威尔法 (Powell's Method)	88
5.8	无约束优化方法的选用	95
<b>第 6 章 约束优化方法</b>		
6.1	约束随机方向搜索法	99
6.2	复合形法 (Complex Method)	102
6.3	可行方向法	107
6.4	内点罚函数法 (Interior Penalty Function Method)	113
6.5	外点罚函数法 (Exterior Penalty Function Method)	117
6.6	混合罚函数法	122
<b>第 7 章 多目标优化设计方法</b>		
7.1	概述	127
7.2	统一目标函数法	129
7.3	主要目标函数法	132
7.4	功效系数法	132
7.5	权数的确定方法	134
7.6	优化计算实例	137
<b>第 8 章 机械模糊优化设计方法</b>		
8.1	概述	140
8.2	模糊优化设计的数学基础	142
8.3	模糊优化设计的基础性概念	198
8.4	对称模糊优化设计	199
8.5	非对称模糊优化设计	208
8.6	多目标模糊优化设计	222
<b>第 9 章 机械模糊优化设计实例</b>		
9.1	圆柱减振弹簧的模糊优化设计	233
9.2	装载机变速器的多目标模糊优化设计	239
9.3	考虑弹流润滑的齿轮传动多目标模糊优化设计	253
9.4	摆动活齿传动的多目标模糊可靠性优化设计	255

<b>第 10 章 遗传算法优化方法</b> .....	264
10.1 概述 .....	264
10.2 传统遗传算法 .....	266
10.3 改进遗传算法 .....	280
10.4 应用遗传算法进行机械优化设计 .....	281
<b>第 11 章 MATLAB 软件在优化设计中的应用</b> .....	287
11.1 MATLAB 系统简介 .....	287
11.2 MATLAB 基本使用方法 .....	288
11.3 MATLAB 优化工具箱 .....	293
11.4 优化工具箱应用实例 .....	295
<b>参考文献</b> .....	301

# 第 1 章 绪 论

优化设计 (Optimal Design) 技术提供了一种在解决机械产品设计问题时, 能从众多的设计方案中找到尽可能完善的或最为适宜的设计方案的先进设计方法。采用优化设计方法能有效提高设计效率 and 设计质量, 优化设计已成为现代机械设计理论和方法中的一个重要领域, 愈来愈受到从事机械设计的科学工作者和工程技术人员的重视。本章简要介绍机械优化设计的基本思想, 优化设计在机械设计中的作用、发展概况和趋势等。

## 1.1 机械优化设计的含义

机械优化设计是在进行某种机械产品设计时, 根据规定的约束条件, 优选设计参数, 使某项或几项设计指标获得最优值。产品设计的“最优值”(Optimum)或“最佳值”, 系指在满足多种设计目标和约束条件下所获得的最令人满意和最适宜的值。最优值的概念是相对的, 随着科学技术的发展及设计条件的变动, 最优化的标准也将发生变化。优化设计反映了人们对客观世界认识的深化, 它要求人们根据事物的客观规律, 在一定的物质基础和技术条件之下, 得出最优的设计方案。下面用一个简单的实例来说明这种设计方法的基本思想。

例如, 要设计某一体积为  $5\text{m}^3$  的包装箱, 其中一边长度不小于  $4\text{m}$ , 在包装箱各个面使用的板材厚度相等的情况下, 要求使用板材最少, 那么包装箱的长  $a$ 、宽  $b$  和高  $h$  各为多少才最节省材料? 通过分析可知, 包装箱的表面积  $S$  与它的长  $a$ 、宽  $b$  和高  $h$  三维尺寸参数有关, 取包装箱的表面积  $S$  作为设计目标。按照传统设计方法, 先固定包装箱某一边长度为  $4\text{m}$ 。在满足包装箱体积为  $5\text{m}^3$  设计要求的前提条件下, 有表 1-1 所示的多种设计方案。

表 1-1 包装箱板材使用最少的优化设计

设计方案		1	2	3	4	5	...
包装箱尺寸参数	宽度 $b/\text{m}$	1.0000	1.1000	1.2000	1.3000	1.4000	...
	高度 $h/\text{m}$	1.2500	1.1364	1.0417	0.9615	0.8929	...
	表面积 $S/\text{m}^2$	20.5000	20.3909	20.4333	20.5923	20.8429	...

如果取包装箱一边长度为  $a > 4\text{m}$  的某一个固定值, 则包装箱的宽度  $b$  和高度  $h$  又有许多种结果, 再从多种可行方案中选择出包装箱表面积  $S$  最小的设计方案。采用优化设计方法, 该问题可以描述为: 在满足包装箱的体积为  $5\text{m}^3$ 、长度  $a \geq 4\text{m}$ 、宽度  $b > 0$  和高度  $h > 0$

的约束条件下，确定设计参数  $a$ 、 $b$  和  $h$  的值，使包装箱的表面积  $S=2(ab+bh+ha)$  达到最小。然后选择合适的优化方法对该问题进行求解，得到的优化结果是： $a=4\text{m}$ ， $b=h=1.118\text{m}$ ， $S=20.3885\text{m}^2$ 。

由此可见，机械优化设计可解决设计方案参数的最佳选择问题。这种选择不仅保证多参数的组合方案满足各种设计要求，而且又使设计指标达到最优值。因此，求解优化设计问题就是一种用数学规划理论和计算机自动选优技术来求解最优化的问题。

对工程问题进行优化设计，首先需要将工程设计问题转化成数学模型，即用优化设计的数学表达式描述工程设计问题。然后，按照数学模型的特点选择合适的优化方法和计算程序，运用计算机求解，获得最优设计方案。随着设计过程的计算机化，自然要为设计过程能自动择取最优方案建立一种迅速而有效的方法，优化设计就是在这种情况下产生和发展起来的一种自动探优的方法。

## 1.2 优化设计与传统设计的比较

机械产品设计工作的任务就是使设计的产品既具有优良的技术性能指标，又能满足生产的工艺性、使用的可靠性和安全性要求，且消耗和成本最低等。机械产品的设计，一般需要经过需求分析、市场调查、方案设计、结构设计、分析计算、工程绘图和编制技术文件等一系列工作过程。

传统设计方法通常是在调查分析的基础上，参照同类产品，通过估算、经验类比或试验等方法来确定产品的初步设计方案。然后对产品的设计参数进行强度、刚度和稳定性等性能分析计算，检查各项性能是否满足设计指标要求。如果不能满足要求，则根据经验或直观判断对设计参数进行修改。整个传统设计的过程是人工试凑和定性分析比较的过程。实践证明，按照传统方法得出的设计方案，可能存在有较大改进和提高的余地。在传统设计中也存在“选优”的思想，设计人员可以在有限的几种合格设计方案中，按照一定的设计指标进行分析评价，选出较好的方案。但是由于传统设计方法受到计算方法和手段等条件的限制，设计者不得不依靠经验，进行类比、推理和直观判断等一系列智力工作，这样是很难找出最优设计方案的。

优化设计理论的研究和应用实践，使传统设计方法发生了根本的变革，从经验、感性和类比为主的传统设计方法过渡到科学、理性和立足于计算分析的现代设计方法，机械产品设计正在逐步向自动化、集成化和智能化方向发展。

## 1.3 优化设计在 CAD 系统中的作用

产品所能达到的质量、性能、价格、寿命等综合指标主要是由设计阶段决定的。设计阶段是产品开发的核心阶段。据有关资料介绍，设计阶段决定了产品制造成本的 75%~80%，而且极大地影响着产品的运行、维修费用。如何在尽可能短的时间内用低的成本设计和制造出高质量的产品，推动了现代设计技术的深入研究和不断发展。

CAD 技术在 20 世纪 80 年代以来得到广泛应用，设计人员借助 CAD 系统进行设计工

作，形成了一种全新的设计过程，即从电子数据处理开始，通过几何建模和图形表达方式的变化到仿真技术和知识处理以及最终发展到产品开发的最优化和虚拟化。

优化设计在 CAD 技术中起着十分重要的作用，因为机械产品设计是一个“设计—评估—再设计”的反复迭代、不断优化的过程（如图 1-1 所示为产品设计过程与 CAD 过程）。CAD 系统是以产品信息建模为基础，以计算机图形处理为手段，以工程数据库为核心对产品进行定义、描述和结构设计，用工程计算方法进行性能分析和仿真等设计活动的信息处理系统。通常，机械产品 CAD 系统的功能可归纳为建立几何模型、分析计算、动态仿真和自动绘图，应具有的基本功能是：产品几何造型功能；2D 与 3D 图形处理功能；3D 运动机构分析与仿真功能；有限元分析功能；优化设计功能；工程绘图功能；数据管理功能。

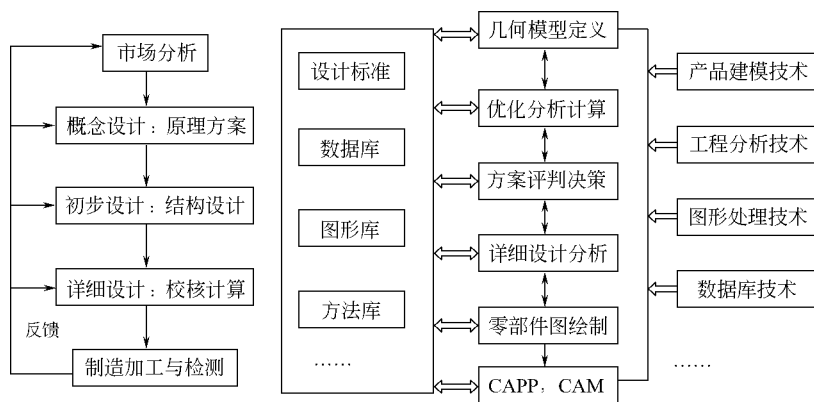


图 1-1 产品设计过程与 CAD 过程

因此，专业机械 CAD 软件系统包含有设计资源数据库、图形库、方法库等资源系统。方法库中包括机械常规设计方法、优化设计方法、有限元分析、可靠性分析、动态分析等先进的设计和分析方法库。在 CAD 中应用优化设计方法，需要解决两个关键问题：一是选择机械设计适用的优化方法，要弄清楚这种优化方法的适用范围及其使用的经济性；二是根据设计要求能自动建立优化设计的数学模型。这是 CAD 系统中进行优化设计的关键技术。总之，优化设计方法在计算机辅助设计中有着重要的作用，也是现代设计方法最重要的研究课题之一。

## 1.4 机械优化设计发展概况

优化方法包括解析方法和数值计算方法两种。利用微分学和变分学的解析方法，可追溯到 Newton、Lagrange 等人对微积分的贡献，Bernoulli、Euler、Lagrange 和 Weirstass 等人奠定的变分学基础理论。包含待定乘子的约束问题优化方法是由 Lagrange 创立，并以其名命名为 Lagrange 乘法。Cauchy 最早应用最速下降法来求解无约束极小化问题。这些经典的优化方法，只能解决小型的和简单的问题，对于大多数工程实际问题是无能为力的。

数值计算方法是利用已知的信息，通过迭代计算过程来逼近最优化问题的解。这种方法由于其运算量大，直至电子计算机出现和发展后才成为现实，并为数值优化方法的发展提供

了重要的基础。20 世纪 50 年代在应用数学领域发展形成了以线性规划和非线性规划为主要内容的数学规划理论，并应用于解决工程设计问题，形成了工程设计的优化设计理论和方法。Dantzig 提出了求解线性规划问题的单纯形法，Bellman 对动态规划问题提出了最优化原理，这两方面的研究为约束优化方法的进展铺平了道路。Kuhn 和 Tucker 关于规划问题最优解的必要条件和充分条件的研究作为以后在非线性规划领域内的大量研究奠定了基础。20 世纪 60 年代初，Zoutendijk 和 Rosen 对非线性规划的贡献有很重要的价值。尽管还没有发现一种方法能普遍适用于求解非线性规划问题，但 Carroll、Fiacco 和 McCormick 的研究使很多非线性规划问题能用无约束优化方法方便地得以解决。

20 世纪 60 年代以来，以计算机为工具、数学规划论为理论基础的优化设计方法逐渐发展形成，它将最优化原理与计算机技术应用于设计领域，在机械、宇航、电机、石油、化工、建筑、造船、轻工等各个行业得到广泛的应用，获得显著的技术与经济效益。例如，起重机主梁、塔架，雷达接收天线结构，机床多轴箱方案，建筑结构等，利用优化设计，可使重量减轻 15% 以上。美国贝尔（Bell）飞机公司采用优化方法解决了具有 450 个设计变量的结构优化问题，使一个飞机机翼的质量减轻了 35%。美国波音公司对 747 飞机机身进行优化设计，收到增加载员、减轻重量、缩短生产周期和降低成本的效果。

机构优化设计是机械优化设计中开展较早的领域之一。在平面连杆机构、空间连杆机构、凸轮机构及组合机构的优化设计等方面都有很好的成果。机械零部件优化设计方面国内外都进行了深入的研究，例如，对液体动压轴承的优化设计，齿轮在最小接触应力情况下的齿廓最佳几何形状，轮齿在满足弯曲和接触强度条件下具有最佳承载能力的非渐开线正齿轮副的设计，定轴齿轮传动在限定最大接触应力、齿面最高温升和保证齿面最小油膜厚度下使单位体积所能传递的扭矩最大的优化设计，二级齿轮减速器在满足强度和一定体积下的单位功率所占的减速器重量最小的设计，通用机床变速箱主传动的最佳级数、传动比和参数的设计，机床齿轮变速箱各轴中心距总和最小化的设计，轴的优化设计，摩擦离合器的优化设计，齿轮泵的优化设计，弹簧的优化设计等问题都有专门著作论述。

优化设计方法发展的历史虽然很短，但进展迅速，无论在机构综合、机械的通用零部件设计，还是在各种专用机械设计和工艺设计方面都很快地得到应用。追其原因，一方面是由于生产和工程设计中确实存在着大量的优化设计问题亟待解决；另一方面是由于电子计算机的日益广泛使用，为采用优化技术提供了有力的计算工具。

美国 MathWorks 公司在 1994 年推出了科技应用软件 MATLAB，它具有强大的科技计算、图形处理、可视化功能和开放式可扩展环境，特别是所附带的优化工具箱（Optimization Toolbox）中包含有一系列优化算法和模块，可以用于求解约束线性最小二乘优化、约束非线性或无约束非线性极小值问题、非线性最小二乘逼近和曲线拟合、非线性系统方程和复杂结构的大规模优化问题。这些为工程优化设计提供的实用计算机程序库，为工程技术人员在计算机上使用各种有效的优化方法创造了条件。

## 1.5 优化设计方法的工程应用领域

从 20 世纪 90 年代以来，优化设计方法取得了巨大的进展，得到了广泛的应用，形成了一门从实践中产生，在实践中发展起来的新兴的学科。从广义来说，优化设计方法可用来解

决任何工程问题。为了说明这一学科的广泛领域，下面列出优化设计方法在不同工程学科的一些典型应用。

- ① 飞行器和宇航结构设计中，满足要求的最小重量。
- ② 空间运载工具的最优轨迹。
- ③ 土木工程结构设计，例如框架、地基、桥梁、支架、烟囱和水坝等，要求成本最小。
- ④ 对于地震、风力和其他随机载荷作用下的结构设计，要求重量最小。
- ⑤ 水利资源系统设计，要求效益最大。
- ⑥ 结构的最优塑性设计。
- ⑦ 连杆、凸轮、齿轮、机床和其他机械产品及零部件的优化设计。
- ⑧ 金属切削过程中加工条件的选择，使生产成本最小。
- ⑨ 材料搬运设备设计，如输送机、卡车和起重机等，要求成本最小。
- ⑩ 泵、涡轮和热交换装置设计，要求效率最大。
- ⑪ 电力设备的优化设计，如电动机、发电机和变压器等。
- ⑫ 电网优化设计。
- ⑬ 销售员在一次旅行中访问不同城市的最短路程问题。
- ⑭ 最优生产规划、最优控制和最优调度。
- ⑮ 根据试验结果，进行统计数据分析和建立经验（实验）模型，使能得到物理现象的最精确的表示。
- ⑯ 化工处理装置和化工厂的优化设计。
- ⑰ 制造业的最优管网的设计。
- ⑱ 工厂地点选择的综合优化问题。
- ⑲ 设备的维修和更换规划，以减少保养费用。
- ⑳ 库存量控制。
- ㉑ 企业资源分配和利用，使效益最大。
- ㉒ 控制生产线中的等待、停机和排队，使费用减少。
- ㉓ 规划最好的策略，使在与对手（竞争者）的竞争中获得最大利润。
- ㉔ 控制系统的最优设计。

.....

## 1.6 现代机械优化设计的发展趋势

机械优化设计是在现代机械设计理论发展基础上产生的一种新的设计方法，在机械设计中的应用取得了良好的效果，但是还有许多问题需要解决。例如，标准零部件系列参数的制定，整机优化设计模型及方法的研究，机械设计的多目标决策问题以及动态系统、模糊系统、随机模型、可靠性优化、智能优化设计等一系列问题，尚需作较大的努力，才能适应现代机械工业发展的需要。目前，现代机械优化设计的研究和发展方向主要如下。

### (1) 模糊优化设计技术

常规的优化设计把设计中的各种因素均处理成确定的二值逻辑，忽略了事物客观存在的模糊性，使得设计变量和目标函数不能达到应有的取值范围，往往会漏掉一些真正的优化方

案。事实上，不仅由于事物差异之间的中介过渡过程所带来的事物普遍存在的模糊性，而且由于研究对象的复杂化必然要涉及到模糊，由于信息技术、人工智能的研究必然要考虑到模糊信息的识别与处理以及由于工程设计不仅要面向用户需求的多样化和个性化，还要以满足社会需求为目标，并依赖社会环境、条件、自然资源、政治经济政策等比较强烈的模糊性问题等，这些都必然使上述领域的优化设计涉及种种模糊因素。如何处理工程设计中客观存在的大量模糊性，这正是模糊优化设计所要解决的问题。模糊优化设计是将模糊理论与普通优化技术相结合的一种新的优化理论与方法，是普通优化设计的延伸与发展。

### (2) 面向产品创新设计的优化技术

产品创新理论、方法与工具技术研究的宗旨是从产品的工作特性和功能目标出发，在特定技术、经济和社会等具体条件下，根据相邻学科的原理，创造性地设计产品，并使它在技术及经济上达到最佳水平。因此，建立面向产品创新设计的优化技术是实现产品创新设计的一个关键技术问题。

### (3) 广义优化设计技术

广义优化设计技术是数值优化技术研究的一个重要方面，目前在离散和随机变量优化、结构优化、智能优化、优化建模和复杂系统优化方法学等领域的研究已取得较多的理论和应用成果，但对向前扩展到建立模型、处理模型，向后扩展到优化结果可视化显示的全过程的研究还需深入进行。同时，企业建模和规划策略技术、复杂系统优化算法、工程数据技术等均是广义优化技术所要研究的重要技术，这些技术的研究将使人们能够对从模型的建立、处理、一直到优化结果显示等全过程进行优化。

### (4) 产品全寿命周期的优化设计技术

设计产品不仅是设计产品的功能和结构，而且要设计产品的规划、设计、生产、经销、运行、使用、维修保养，直到回收再用处置的全寿命周期过程。全寿命周期设计意味着，在设计阶段就要考虑到产品寿命历程的所有环节，以求产品全寿命周期的所有相关因素在产品分析阶段就能得到综合规划和优化。产品全寿命周期设计涉及到大量的非数值知识，现有的简单的数值化方法不能很好反映非数值知识的本质，不仅造成模型的失真，更使模型不易被用户理解。解决数值和非数值混合知识的表达和进化已成为产品全过程寻优的关键。

### (5) CAD/CAPP/CAM 集成系统中的优化技术

CAD/CAPP/CAM 集成系统是目前产品设计制造的一种先进技术方法，通过对产品的三维建模、运动分析、动力分析、应力分析，确定零部件的合理结构形状，自动生成工程图样文件，由 CAPP/CAM 系统对数据库中的图形数据文件进行工艺设计及数控加工编程，控制数控机床完成加工制造。在这一集成系统中需要进一步研究的是：产品开发过程的动、静态描述（建模）方法、图形化显示、编辑技术以及在资源约束下产品开发过程的优化算法，提出改进的产品开发流程；产品开发的结果能做综合性的优化处理，得出经济上最合理、技术上最先进的最优化设计方案和产品。

### (6) 智能优化算法及其研究趋势

20 世纪 80 年代以来，一些新颖的优化算法，如人工神经网络（Neural Networks）、遗传算法（Genetic Algorithm）、进化算法（Evolution Algorithm）、模拟退火（Simulated Annealing）及其混合优化策略等，通过模拟或揭示某些自然现象或过程而得到发展，其思想和内容涉及数学、物理学、生物进化、人工智能、统计力学和神经系统等方面，为解决复

杂问题提供了新的思路和手段。由于这些算法构造的直观性和自然机理，被称为智能优化算法 (Intelligent Optimization Algorithms)。智能优化算法在解决大规模组合、全局寻优等复杂问题时具有传统方法所不具备的独特优越性，并且鲁棒性强，适于并行处理，在计算机科学、优化调度、运输问题、组合优化等领域得到了广泛研究与应用。智能优化算法的发展不仅取决于理论研究，应用实践在很大程度上也在影响理论研究的方向。智能优化算法的研究呈现如下趋势：智能优化算法的计算机理；智能优化算法结合具体应用领域的改进与深化；智能优化计算方法之间相互交叉结合。

# 第 2 章 机械优化设计的基本概念和数学模型

## 2.1 优化问题的实例

为了对机械优化设计有更深入的认识，现举一些实例来加以说明。

**【例 2-1】** 欲用薄钢板制造一体积为  $6\text{m}^3$ ，高度为  $1\text{m}$ ，长度不小于  $3\text{m}$  的无盖货箱（如图 2-1 所示），试确定货箱的长  $x_1$  和宽  $x_2$ ，使耗费的钢板最少。

本例中，货箱的长度尺寸  $x_1$  和宽度尺寸  $x_2$  是需要确定的参数，而满足体积为  $6\text{m}^3$ ，高度为  $1\text{m}$ ，长度不小于  $3\text{m}$  等条件的货箱长度  $x_1$  和宽度  $x_2$  可以有无限多组，例如： $x_1 = 3\text{m}$ ， $x_2 = 2\text{m}$ ； $x_1 = 3.2\text{m}$ ， $x_2 = 1.875\text{m}$ ； $x_1 = 4\text{m}$ ， $x_2 = 1.5\text{m}$ ……其中哪一组参数最好呢？使耗费钢板最少的那一组参数最好，这组参数就是本例的最优解，记为  $x_1^*$  和  $x_2^*$ 。寻求最优解的方法称为优化方法。这类问题即为优化问题。

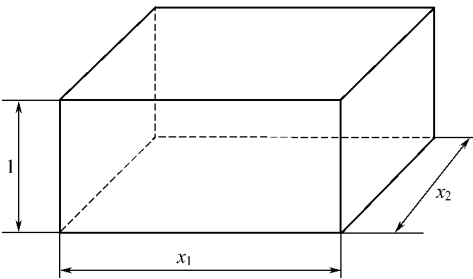


图 2-1 货箱

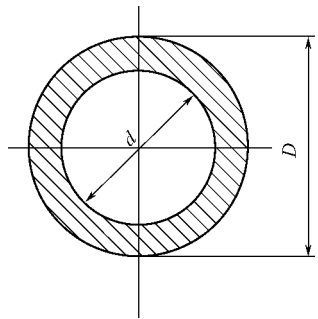


图 2-2 空心传动轴的轴横截面形状

**【例 2-2】** 试设计一重量最轻的空心传动轴。空心传动轴的轴横截面形状如图 2-2 所示，图中  $D$ 、 $d$  分别为轴的外径和内径。轴的长度不得小于  $3\text{m}$ 。轴的材料为 45 钢，密度  $\rho$  为  $7.8 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$ ，弹性模量  $E = 2 \times 10^5 \text{MPa}$ ，许用切应力  $[\tau] = 60 \text{MPa}$ 。轴所受扭矩为  $M = 1.5 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{mm}$ 。

设计空心传动轴就是要确定空心传动轴的外径  $D$ 、内径  $d$ 、长度  $l$  这一组参数，这组参数除应满足强度、扭皱稳定性和结构尺寸要求外，还应达到重量最轻的目的。

**【例 2-3】** 某厂因生产需要，欲购进五种配件，其个数分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 。每种配件的单价分别为 60 元、80 元、85 元、100 元、120 元。要求  $x_1$  不少于 20 个， $x_3$  不少于 40 个，其余每种配件不少于 30 个， $x_1$ 、 $x_2$  之和不少于 80 个， $x_3$ 、 $x_4$  之和不少于 200

个,  $x_1$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$  之和不少于 400 个。问每种配件为多少个, 配件总的进价才最低。

影响总进价的因素是每种配件的个数。本例是要求一组参数  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ , 这组参数应在满足一定的条件下, 使所有配件的总进价最低。

**【例 2-4】** 制造一批设备, 需用毛坯长度分别为 2.5m, 1.5m 和 1.3m 的同型号槽钢各 120 根、240 根和 300 根。这些不同长度的槽钢都将用长度为 6m 的槽钢截得。问如何下料用料最省。

本例中, 下料的方案有若干个, 要求找出其中最佳的方案, 该方案应在满足设备所需不同规格槽钢根数的条件下, 使用料最省。

**【例 2-5】** 图 2-3 为一圆弹簧丝的螺旋扭转弹簧。已知, 弹簧在垂直于其轴线的平面内受到一个扭矩  $T$  作用, 所产生的变形即扭角为  $\phi$ , 弹簧的许用弯曲应力为  $[\sigma_b]$ , 弹性模量为  $E$ 。弹簧的结构尺寸要求为: 钢丝直径  $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$ , 外径  $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$ , 弹簧圈数  $n \geq n_1$ , 旋绕比  $4 \leq C \leq 8$ 。试设计该弹簧, 要求其重量最轻。

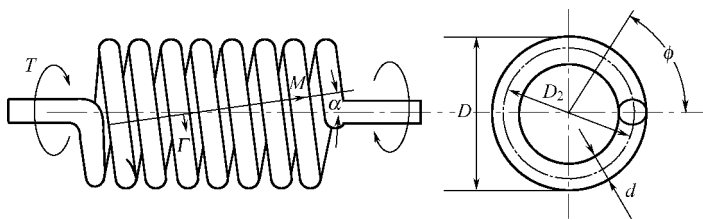


图 2-3 螺旋扭转弹簧的受力分析

设计该弹簧就是要确定弹簧的钢丝直径  $d$ 、弹簧中径  $D_2$  以及弹簧圈数  $n$  这三个参数的值。这三个参数值应使弹簧重量最轻, 并满足强度、刚度等性能要求和结构尺寸要求。

**【例 2-6】** 试设计一闭式直齿圆锥齿轮传动。已知: 小锥齿轮悬臂支承, 大锥齿轮两端支承, 轴交角  $\Sigma = 90^\circ$ , 小锥齿轮传递扭矩  $T_1 = 40\text{N} \cdot \text{m}$ , 转速  $n_1 = 960\text{r}/\text{min}$ , 齿数比  $u = 3$ , 精度等级为 7 级, 电动机驱动, 工作机载荷稳定, 两班制工作, 使用期限为 8 年。小锥齿轮选用 40Cr, 调质处理, 硬度为 241~286HB, 大锥齿轮选用 42SiMn, 调质处理, 硬度为 217~255HB。要求所设计的圆锥齿轮传动体积小。

本例是要确定独立设计参数: 小齿轮齿数  $z_1$ 、大端模数  $m$ 、齿宽系数  $\psi_R$  的值。这组值不仅要满足齿轮的强度要求, 而且还要使锥齿轮传动体积小 (重量轻)。

**【例 2-7】** 某一带式运输机中的第一级采用普通 V 带传动。已知动力机为 Y 系列三相异步电动机, 其额定功率  $P = 7.5\text{kW}$ , 转速  $n_1 = 1440\text{r}/\text{min}$ , 从动带轮的转速  $n_2 = 630\text{r}/\text{min}$ , 允许误差为  $\pm 5\%$ , 两班制工作, 运输装置工作时会有轻度冲击。试设计此带传动, 要求带传动的轮廓尺寸最小。

带传动的设计参数主要有带的型号、带的根数  $z$ 、小带轮直径  $D_1$ 、大带轮直径  $D_2$ 、带的长度  $L$ 、中心距  $a$ 、小带轮包角  $\alpha_1$ 、带的张紧力  $F_0$  以及作用在轴上的载荷  $F_Q$ 。由于参数  $D_2$ 、 $a$ 、 $\alpha_1$ 、 $F_0$ 、 $F_Q$  可由参数传动比  $i$  ( $i = n_1/n_2 = D_2/D_1$ )、 $D_1$ 、 $L$ 、 $z$  通过有关公式确定, 所以本例的独立设计参数只有带的型号、 $D_1$ 、 $L$ 、 $z$ 。

本例是要通过优选带的型号、 $D_1$ 、 $L$ 、 $z$  这组参数得到具有最小轮廓且满足 V 带根数、小带轮包角等限制条件的带传动。

上述所有问题的共同点是每个问题都有一个追求的目标, 例如: 耗费的钢板最少, 空心转轴重量最轻, 配件总进价最低……凡是在满足题中要求和条件的情况下使达到目标的参数

就是最优参数。

## 2.2 机械优化设计的数学模型

### 2.2.1 优化设计的一般数学模型

首先分析前面 2.1 中几个实例的数学模型，以说明如何将实际中的优化问题用数学模型加以描述。

例 2-1 货箱的体积为

$$V = x_1 x_2 = 6$$

每个货箱的表面积为

$$S = 2x_1 + 2x_2 + x_1 x_2 \quad (2-1)$$

钢板的耗费量与货箱的表面积  $S$  成正比。

设 
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

则数学模型为：

极小化目标函数

$$\min f(\mathbf{X}) = 2x_1 + 2x_2 + x_1 x_2$$

且满足约束条件

$$g_1(\mathbf{X}) = x_1 x_2 = 6$$

$$g_2(\mathbf{X}) = x_1 - 3 \geq 0$$

$$g_3(\mathbf{X}) = x_1 > 0$$

$$g_4(\mathbf{X}) = x_2 > 0$$

例 2-2 空心传动轴的质量  $W$  的计算式为

$$W = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) l \rho$$

将  $\rho$  的值代入上式并整理得

$$W = 6.12 \times 10^{-6} \times (D^2 - d^2) l \quad (2-2)$$

所设计的空心传动轴应满足以下条件。

(1) 扭转强度

空心传动轴的扭转切应力不得超过许用值，即

$$\tau \leq [\tau] \quad (2-3)$$

空心传动轴的扭转切应力

$$\tau = \frac{16MD}{\pi(D^4 - d^4)} \quad (2-4)$$

将式 (2-4) 及已知数据代入式 (2-3) 并经整理得

$$d^4 - D^4 + 1.27 \times 10^5 D \leq 0$$

(2) 扭皱稳定性

扭转切应力不得超过扭转稳定的临界切应力  $\tau'$ ，即

$$\tau \leq \tau' \quad (2-5)$$

空心传动轴的扭转稳定的临界切应力为

$$\tau' = 0.7E \left( \frac{D-d}{2D} \right)^{3/2} \quad (2-6)$$

将式 (2-4)、式 (2-6) 及已知数据代入式 (2-5), 并整理得

$$\frac{154.34D}{D^4-d^4} - \left( \frac{D-d}{D} \right)^{3/2} \leq 0$$

(3) 结构尺寸

① 空心传动轴的长度不得小于给定值, 即

$$l \geq l_{\min} \quad (2-7)$$

其中  $l_{\min}$  为题目给定的最小长度, 为 3m。故

$$3-l \leq 0$$

②  $d \geq 0$

③  $D-d > 0$

设  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ d \\ l \end{bmatrix}$ , 则数学模型为:

极小化目标函数

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{X}) &= 6.12(D^2-d^2)l \times 10^{-6} \\ &= 6.12(x_1^2-x_2^2)x_3 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

满足约束条件

$$\begin{aligned} g_1(\mathbf{X}) &= d^4 - D^4 + 1.27D \times 10^5 = x_2^4 - x_1^4 + 1.27 \times 10^5 \leq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) &= \frac{154.34D}{D^4-d^4} - \left( \frac{D-d}{D} \right)^{3/2} = \frac{154.34x_1}{x_1^4-x_2^4} - \left( \frac{x_1-x_2}{x_1} \right)^{3/2} \leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) &= 3-l = 3-x_3 \leq 0 \\ g_4(\mathbf{X}) &= d = x_2 \geq 0 \\ g_5(\mathbf{X}) &= D-d = x_1-x_2 > 0 \end{aligned}$$

例 2-3 所有配件的总进价  $P$  为

$$P = 60x_1 + 80x_2 + 85x_3 + 100x_4 + 120x_5$$

设

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$$

则数学模型为:

极小化目标函数

$$\min f(\mathbf{X}) = 60x_1 + 80x_2 + 85x_3 + 100x_4 + 120x_5$$

且满足约束条件

$$\begin{aligned} g_1(\mathbf{X}) &= x_1 + x_2 \geq 80 \\ g_2(\mathbf{X}) &= x_3 + x_4 \geq 200 \\ g_3(\mathbf{X}) &= x_1 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 400 \\ g_4(\mathbf{X}) &= x_1 \geq 20 \\ g_5(\mathbf{X}) &= x_2 \geq 30 \\ g_6(\mathbf{X}) &= x_3 \geq 40 \\ g_7(\mathbf{X}) &= x_4 \geq 30 \end{aligned}$$