

高等院校教材

现代设计理论与方法

张鄂主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较全面系统地介绍了现代设计理论与方法,内容包括:优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计、有限元法、工业造型设计、反求工程设计、绿色设计、动态设计、系统化设计与创造性设计和摩擦学设计等。

本书既有现代设计理论与方法体系较广的覆盖面,又能加强重点,从而使学生在有限的课时内,既能对本门新兴学科有较全面的了解,又能对其中重要的设计方法有较深入了解与应用,以提高他们的创新设计技能。

本书可作为高等学校机械工程类、能源动力类及相关专业本科生的教材,也可作为工程技术人员继续教育的培训教材,还可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代设计理论与方法/张鄂主编. —北京:科学出版社,2007.3

高等院校教材

ISBN 978-7-03-018623-2

I. 现… II. 张… 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(2007)第 022716 号

责任编辑:孙明星 段博原 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 3 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 3 月第一次印刷 印张:24

印数:1—4 000 字数:454 200

定价:30.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

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，设计领域正在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、系统、完善和先进。传统设计方法已发展成为一门新兴的综合性、交叉性学科——现代设计理论与方法。现代设计理论与方法的广泛应用，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，对提高我国工业产品的设计质量，缩短设计周期，推动设计工作的现代化、科学化方面将发挥重大作用。

基于现代设计理论与方法种类繁多，内容又十分广泛的特点，为了满足本课程的教学需要，编者结合多年来从事本课程的教学和科研工作的经验，选用了十种现代设计方法进行介绍，并将重点又放在实践中应用十分广泛的五种现代设计方法：优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计、有限元法和工业造型设计等现代设计方法上。这样使本书既有现代设计理论与方法体系较广的覆盖面，又能加强重点，从而使学生在有限的课时内，既能对本门新兴学科有较全面的了解，又能对其中重要的设计方法有较深入了解与应用，以提高他们的创新设计技能。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。

本书是在多次使用的教学讲义、教材基础上编写的。在内容组织上，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证明和数学推导。本书的特点是：内容丰富，适应面广，重点突出，内容先进，学以致用。本书除了适宜作为高等学校机械类、机电类、能源动力机械类及相关专业本科生教材外，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、企业管理工作者以及有关专业青年教师参考使用。

参加本书编写的有：张鄂（第1，2，10，11章），徐海波、刘明利（第3章），白文杰（第4章），刘中华（第5，9章），周亚滨（第6章），计志红（第7章），许林安（第8章）。全书由张鄂任主编。聿振南教授和张言羊教授仔细审阅了全稿，提出了宝贵的意见，特此致谢。

本书承蒙清华大学吴宗泽教授和西北工业大学陈国定教授审稿，他们对本书都提出了宝贵的意见，并给予了很大支持和帮助，作者在此深表谢意。科学出版

社孙明星、段博原编辑对全部书稿进行了认真而细致地编辑。本书为西安交通大学“十一五”重点规划教材，在此，对学校教务处、学院等单位和个人的大力支持和帮助也表示衷心的感谢。

鉴于现代设计理论与方法内容涉及面广，发展迅速，加之编者水平有限，书中会有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

编 者

2006年12月于西安交通大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 现代设计	1
1.1.1 设计及其内涵	1
1.1.2 设计发展的基本阶段	2
1.1.3 现代设计与传统设计	4
1.2 现代设计理论和方法的主要内容及特点	5
1.2.1 现代设计理论和方法的主要内容	5
1.2.2 现代设计方法的特点	6
1.3 现代产品的设计类型及进程	7
1.3.1 现代产品的特点与设计要求	7
1.3.2 现代产品的设计类型及进程	8
1.4 学习现代设计方法的意义和任务	10
习题	11
第 2 章 优化设计	13
2.1 概述	13
2.1.1 优化设计基本概念	13
2.1.2 优化设计的数学模型	14
2.1.3 优化问题的分类	22
2.1.4 优化设计的迭代算法	23
2.2 优化方法的数学基础	26
2.2.1 二次型与正定矩阵	26
2.2.2 函数的方向导数和梯度	28
2.2.3 多元函数的泰勒近似展开式和海森矩阵	31
2.2.4 无约束优化问题的极值条件	32
2.2.5 约束优化问题的极值条件	34
2.3 一维优化方法	37
2.3.1 搜索区间的确定	38
2.3.2 黄金分割法	39
2.3.3 二次插值法	43

2.4	多维无约束优化方法	46
2.4.1	坐标轮换法	46
2.4.2	鲍威尔法	47
2.4.3	梯度法	54
2.4.4	牛顿法	55
2.4.5	变尺度法	57
2.5	约束优化方法	63
2.5.1	复合形法	64
2.5.2	惩罚函数法	70
2.6	多目标优化方法	78
2.6.1	线性加权组合法	79
2.6.2	功效系数法	80
2.6.3	主要目标法	81
2.7	工程优化设计应用	82
2.7.1	工程优化设计的一般步骤	82
2.7.2	工程优化设计实例	83
	习题	90
第3章	可靠性设计	92
3.1	概述	92
3.1.1	可靠性科学的发展	92
3.1.2	可靠性的概念及特点	92
3.1.3	可靠性设计的基本内容	94
3.2	可靠性设计常用指标	95
3.3	可靠性设计中常用分布函数	101
3.4	机械强度可靠性设计	109
3.4.1	应力-强度分布干涉理论	111
3.4.2	零件强度可靠度的计算	114
3.4.3	零件强度分布规律及分布参数的确定	114
3.4.4	零件工作应力分布规律及分布参数的确定	116
3.4.5	强度可靠性计算条件式与许用可靠度	117
3.4.6	机械零部件强度可靠性设计的应用	119
3.5	疲劳强度可靠性分析	121
3.5.1	疲劳曲线	121
3.5.2	等幅变应力作用下零件的疲劳寿命及可靠度	124
3.5.3	不稳定应力作用下零件的疲劳寿命	126

3.5.4 承受多级变应力作用的零件在给定寿命时的可靠度	127
3.6 系统可靠性设计	129
3.6.1 元件可靠性预测	129
3.6.2 系统可靠性预测	131
3.6.3 系统可靠性分配	135
习题	139
第4章 计算机辅助设计	141
4.1 概述	141
4.2 CAD 系统	143
4.2.1 CAD 系统的硬件	144
4.2.2 CAD 系统的软件	144
4.2.3 CAD 系统的形式	145
4.2.4 CAD 系统的功能	146
4.3 工程数据的处理方法及 CAD 程序编制	147
4.3.1 数表的分类及存取	147
4.3.2 线图的分类及处理	151
4.3.3 列表函数表的插值算法	156
4.3.4 数据的公式拟合方法	162
4.3.5 数据文件及其应用	164
4.4 机械工程数据库的创建与应用	165
4.4.1 数据库与数据库管理系统	165
4.4.2 关系数据库管理系统应用实例简介	166
4.4.3 工程数据库	167
4.5 计算机图形处理与三维造型	168
4.5.1 计算机绘制工程图的常用方法	169
4.5.2 坐标系	170
4.5.3 二维图形的几何变换	171
4.5.4 三维造型	176
4.6 专用机械 CAD 系统的开发及应用	179
4.6.1 二维 CAD 软件的二次开发技术	179
4.6.2 三维 CAD 软件的二次开发技术	181
习题	184
第5章 有限元法	189
5.1 概述	189
5.2 单元特性的推导方法	192

5.2.1	单元划分方法及原则	192
5.2.2	单元特性的推导方法	194
5.3	有限元法的工程应用	204
5.3.1	有限元法的解题步骤	204
5.3.2	计算实例	208
5.4	有限元软件简介	212
	习题	215
第6章	工业造型设计	217
6.1	概述	217
6.1.1	工业造型设计的基本内容与基本要素	217
6.1.2	产品造型设计的原则	218
6.1.3	产品造型的美学内容	219
6.1.4	产品造型设计的程序	220
6.2	造型基础与美学法则	221
6.2.1	形态要素及其视觉结果	221
6.2.2	产品造型的美学法则	225
6.3	人机工程学简介	230
6.3.1	人体结构尺寸与造型尺度	231
6.3.2	视觉特征与显示器设计	232
6.3.3	控制器的选择与设计	233
6.3.4	控制台板设计	235
6.4	产品的色彩设计	235
6.4.1	色彩的基本知识	235
6.4.2	产品色彩设计	239
6.5	计算机辅助工业设计 (CAID)	240
6.5.1	计算机辅助工业设计 (CAID) 常用的软件	240
6.5.2	三维软件制作产品模型实例	242
	习题	243
第7章	反求工程设计	245
7.1	概述	245
7.2	反求工程设计的基本内容及原理	250
7.2.1	反求工程设计的基本内容及类型	250
7.2.2	反求工程设计的基本原理	252
7.3	相似理论及相似设计方法简介	255
7.3.1	相似理论简介	255

7.3.2 相似设计方法	262
7.4 反求工程的原理与方法	263
7.4.1 设计反求	263
7.4.2 材料反求	266
7.4.3 工艺反求	266
习题	267
第 8 章 绿色设计	268
8.1 概述	268
8.2 绿色技术	270
8.2.1 绿色产品	271
8.2.2 绿色制造	273
8.3 绿色设计的内容和方法	274
8.3.1 绿色设计的内容	274
8.3.2 绿色设计方法	277
8.3.3 绿色设计的材料选择	281
8.3.4 绿色设计的关键技术	282
8.3.5 绿色设计评价	282
8.3.6 绿色设计的效益和应用分析	286
习题	288
第 9 章 动态设计	289
9.1 概述	289
9.2 动态设计的有关概念和基本原理	291
9.3 轴类部件的动态分析和设计	295
9.3.1 轴类部件的动态分析	295
9.3.2 轴类部件的动态设计	298
习题	301
第 10 章 系统化设计法和创造性设计法	302
10.1 概述	302
10.2 系统化设计法	303
10.2.1 技术过程及技术系统	303
10.2.2 功能分析法	305
10.2.3 系统化设计法设计应用举例	310
10.3 创造性设计法	312
10.3.1 创造力和创造过程	312
10.3.2 创造性思维及其特点和类型	313

10.3.3 创造技法	317
习题	320
第 11 章 摩擦学设计	321
11.1 摩擦学设计概述	321
11.2 金属表面的摩擦和磨损	322
11.2.1 金属表面特性	322
11.2.2 摩擦	324
11.2.3 磨损	328
11.2.4 机械零部件的典型磨损过程	333
11.3 摩擦学设计中的减摩和耐磨材料的选择	335
11.3.1 减摩材料的设计与选择	335
11.3.2 摩阻材料的设计与选择	338
11.3.3 耐磨材料的选择	340
11.3.4 表面耐磨强化处理	341
11.4 润滑和润滑系统设计	345
11.4.1 摩擦副间的基本润滑状态	345
11.4.2 流体动压润滑原理及动压滑动轴承的设计	348
11.4.3 润滑材料	360
11.4.4 润滑系统设计	364
11.5 摩擦学系统的监测与诊断技术	367
习题	369
参考文献	371

第 1 章 绪 论

1.1 现代设计

1.1.1 设计及其内涵

设计是人类改造自然的基本活动之一。它与人类的生产活动及生活密切相关。人类在改造自然的历史长河中，一直从事设计活动。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。

设计一词有广义和狭义两种概念。广义概念是指对发展过程的安排，包括发展的方向、程序、细节及达到的目标。狭义的概念是指将客观需求转化为满足该需求的技术系统（或技术过程）的活动。目前，各种产品包括机、电产品的设计即属此种。

随着科学技术和生产力的不断发展，设计和设计科学也在不断向深度和广度发展，其内容、要求、理论和手段等都在不断更新。目前科技界对设计尚无统一的定义，但对设计的基本内涵都有共同的认识。其中对设计含义的一些典型提法如下：

设计是一种创造性活动，设计的核心是创造性，如果没有创新，就不叫设计。

设计是一种优化过程，是在给定条件下，针对目标谋求最优解的过程。

设计是把各种先进技术转化为生产力的一种手段，它反映当时生产力的水平，是先进生产力的代表。

设计是一种技术性、经济性、社会性、艺术性的综合产物。

设计是为满足需求而进行的一种创造性思维活动的实践过程。

设计是通过分析、创造与综合，创造性地建立满足特定功能要求的技术系统的活动过程。

对此，我们综合来理解设计的含义，即为了满足人类与社会的功能要求，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，产生载有相应的文字、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为目的，然后通过实践转化为某项工程，或通过制造，成为产品，而造福于人类。产品设计过程从本质上说就是创造性的思维与活动过程，是将创新构思转化为有

竞争力的产品的过程。

从对设计含义的理解出发可以看出，工业产品设计具有以下特征：

1) 需求特征。产品设计的目的是满足人类社会的需求，即设计始于需要，没有需要就没有设计。

2) 创造性特征。时代的发展，使人们的需求、自然环境、社会环境都处于变化之中，从而要求设计者适应条件变化，不断更新老产品，创造新产品。人们从机车的发展历史，即由蒸汽机车→内燃机车→电力机车→磁悬浮机车，可见设计活动的不断创造发明的特征。

3) 程序特征。任何一种产品的设计都有一定的设计过程，它是指从明确设计任务到编制技术文件所进行的整个设计工作的流程。设计过程一般可分为四个主要阶段：产品规划、原理方案设计、技术设计和施工设计。这种过程叫做设计程序。按设计程序进行工作，才能提高效率，保证产品的设计质量。

4) 时代特征。设计活动受时代的物质条件、技术水平的限制，如设计方法、设计手段、材料、制造工艺等。所以，各种产品设计都具有时代的烙印。

认识了产品设计的特征，才能全面地、深刻地理解设计活动的本质，进而研究与设计活动有关的各种问题，以提高设计的质量和效率。

1.1.2 设计发展的基本阶段

为了便于了解现代设计与传统设计的区别，先来简单回顾一下人类从事设计活动发展的几个基本阶段。从人类生产的进步过程来看，整个设计进程大致经历了如下四个阶段：

1) 直觉设计阶段。古代的设计是一种直觉设计。当时人们或许是从自然现象中直接得到启示，或是全凭人的直观感觉来设计制作工具。设计者多为具有丰富经验的手工艺人，他们之间没有信息交流。产品的制造只是根据制造者本人的经验或其头脑中的构思完成的，设计与制造无法分开。设计方案存在于手艺人头脑之中，无法记录表达，产品也是比较简单的。一项简单产品的问世，周期很长，这是一种自发设计。直觉设计阶段在人类历史中经历了一个很长的时期，17世纪以前基本都属于这一阶段。

2) 经验设计阶段。随着生产的发展，产品逐渐复杂起来，对产品的需求量也开始增大，单个手工艺人的经验或其头脑中自己的构思已难满足这些要求，因而促使手艺人必须联合起来，互相协作，逐渐出现了图纸，并开始利用图纸进行设计。一部分经验丰富的人将自己的经验或构思用图纸表达出来，然后根据图纸组织生产。到17世纪初，数学与力学结合后，人们开始运用经验公式来解决设计中一些问题，并开始按图纸进行制造，如早在1670年就已经出现了有关大海船的图纸。图纸的出现，既可使具有丰富经验的手艺人通过图纸将其经验或

构思记录下来，传于他人，便于用图纸对产品进行分析、改进和提高，推动设计工作向前发展；还可满足更多的人同时参加同一产品的生产活动，满足社会对产品的需求及生产率的要求。因此利用图纸进行设计，使人类设计活动由自发设计阶段进步到经验设计阶段。

3) 半理论半经验设计阶段。20世纪初以来，由于试验技术与测试手段的迅速发展和应用，人们把对产品采用局部试验、模拟试验等作为设计辅助手段。通过中间试验取得较可靠的数据，选择较合适的结构，从而缩短了试制周期，提高了设计可靠性。这个阶段称为半理论半经验设计阶段（又称中间试验设计阶段）。在这个阶段中，随着科学技术的进步、实验手段的加强，使设计水平得到进一步提高，共取得了如下进展：①加强设计基础理论和各种专业产品设计机理的研究，如材料应力应变、摩擦磨损理论，零件失效与寿命的研究，从而为设计提供了大量信息，如包含大量设计数据的图表（图册）和设计手册等。②加强关键零件的设计研究。特别是加强了关键零部件的模拟试验，大大提高了设计速度和成功率。③加强了“三化”，即零件标准化、部件通用化、产品系列化的研究。后来又提出设计组合化。这便进一步提高了设计的速度、质量，降低了产品的成本。

本阶段由于加强了设计理论和方法的研究，与经验设计相比，这阶段设计的特点是大大减少了设计的盲目性，有效地提高了设计效率和质量并降低了设计成本。至今，这种设计方法仍被广泛采用。

4) 现代设计阶段。近40年来，由于科学和技术迅速发展，对客观世界的认识不断深入，设计工作所需的理论基础和手段有了很大进步，特别是电子计算机技术的发展及应用，对设计工作产生了革命性的突变，为设计工作提供了实现设计自动化的条件。例如CAD技术能得出所需要的设计计算结果资料和生产图纸，一体化的CAD/CAM技术可将CAD的输出结果通过工程数据库以及有关应用接口作为CAM的输入信息，并直接输出记录有关信息的纸带，使用这种纸带，NC机床即可直接加工出所设计的零件，实现无图纸化生产，使人类设计工作步入现代设计阶段。

此外，步入现代设计阶段的另一个特点就是，当代对产品的设计已不能仅考虑产品本身，并且还要考虑对系统和环境的影响；不仅要考虑技术领域，还要考虑经济、社会效益；不仅考虑当前，还需考虑长远发展。例如，汽车设计，不仅要考虑汽车本身的有关技术问题，还需考虑使用者的安全、舒适、操作方便等人机功效特性。此外，还需考虑汽车的节能、环保以及车辆存放、道路发展等问题。总之，目前已进入现代设计阶段，它已要求在设计工作中把自然科学、社会科学、人类工程学，以及各种艺术、实际经验和聪明才智融合在一起，用于设计中。

1.1.3 现代设计与传统设计

20 世纪以来, 由于科学和技术的发展与进步, 对设计的基础理论研究得到加强, 随着设计经验的积累, 以及设计和工艺的结合, 已形成了一套半经验半理论的设计方法。依据这套方法进行机电产品设计, 称为传统设计。所谓“传统”是指这套设计方法已沿用了很长时间, 直到现在仍被广泛地采用着。传统设计又称常规设计。

传统设计是以经验总结为基础, 运用力学和数学而形成的经验、公式、图表、设计手册等作为设计的依据, 通过经验公式、近似系数或类比等方法进行设计。传统设计在长期运用中得到不断地完善和提高, 是符合当代技术水平的有效设计方法。但由于所用的计算方法和参考数据偏重于经验的概括和总结, 往往忽略了一些难解或非主要的因素, 因而造成设计结果的近似性较大, 也难免有不确切和失误。此外, 在信息处理、参量统计和选取、经验或状态的存储和调用等还没有一个理想的有效方法, 解算和绘图也多用手工完成, 所以不仅影响设计速度和设计质量的提高, 也难以做到精确和优化的效果。传统设计对技术与经济、技术与美学也未能做到很好地统一, 使设计带来一定的局限性。这些都是有待于进一步改进和完善的不足之处。

限于历史和科技发展的原因, 传统设计方法基本上是一种以静态分析、近似计算、经验设计、手工劳动为特征的设计方法。显然, 随着现代科技的飞速发展, 生产技术的需要和市场的激烈竞争, 以及先进设计手段的出现, 这种传统设计方法已难以满足当今时代的要求, 从而迫使设计领域不断研究和发展新的设计方法和技术。

现代设计是过去长期的传统设计活动的延伸和发展, 它继承了传统设计的精华, 吸收了当代科技成果和计算机技术。与传统设计相比, 它则是一种以动态分析、精确计算、优化设计和 CAD 为特征的设计方法。

现代设计方法与传统设计方法相比, 主要完成了以下几方面的转变:

- 1) 产品结构分析的定量化;
- 2) 产品工况分析的动态化;
- 3) 产品质量分析的可靠化;
- 4) 产品设计结果的最优化;
- 5) 产品设计过程的高效化和自动化。

目前, 我国设计领域正面临着由传统设计向现代设计过渡, 广大设计人员应尽快适应这一新的变化。通过推行现代设计, 尽快提高我国机电产品的性能、质量、可靠性和在市场的竞争能力。

1.2 现代设计理论和方法的主要内容及特点

1.2.1 现代设计理论和方法的主要内容

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设计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，现代设计理论和方法更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。

现代设计理论与方法是以研究产品设计为对象的科学。它以电子计算机为手段，运用工程设计的新理论和新方法，使计算结果达到最优化，使设计过程实现高效化和自动化。通过传统经验的吸收、现代科技的运用、科学方法论的指导与方法学的实现，从而形成和发展了现代设计理论与方法这门新学科。

从20世纪60年代末开始，设计领域中相继出现一系列新兴理论与方法。为区别过去常用的传统设计理论与方法，把这些新兴理论与方法统称为现代设计。表1-1列出了目前现代设计理论和方法的主要内容。不同于传统设计方法，在运用现代设计理论和方法进行产品及工程设计时，一般都以计算机作为分析、计算、综合、决策的工具。

表 1-1 现代设计的主要理论和方法

1	设计方法学	9	绿色设计	17	三次设计
2	优化设计	10	模块化设计	18	人机工程
3	可靠性设计	11	相似设计	19	健壮设计
4	计算机辅助设计	12	虚拟设计	20	精度设计
5	动态设计	13	疲劳设计	21	工程遗传算法
6	有限元法	14	智能工程	22	设计专家系统
7	反求工程设计	15	价值工程	23	摩擦学设计
8	工业艺术造型设计	16	并行设计	24	人工神经元计算方法等

现代设计理论和方法的内容众多而丰富，它们是由既相对独立又有机联系的“十一论”方法学构成，即：功能论（可靠性为主体）、优化论、离散论、对应论、艺术论、系统论、信息论、控制论、突变论、智能论和模糊论。这十一论方法学的作用如下：

- 1) 信息论方法学（信号处理是现代设计的依据）；
- 2) 功能论方法学（功能实现是现代设计的宗旨）；
- 3) 系统论方法学（系统分析是现代设计的前提）；
- 4) 突变论方法学（突变创造是现代设计的基石）；
- 5) 智能论方法学（智能运用是现代设计的核心）；

- 6) 优化论方法学 (广义优化是现代设计的目标);
- 7) 对应论方法学 (相似模糊是现代设计的捷径);
- 8) 控制论方法学 (动态分析是现代设计的深化);
- 9) 离散论方法学 (离散处理是现代设计的细解);
- 10) 艺术论方法学 (悦心宜人是现代设计的美感);
- 11) 模糊论方法学 (模糊定量是现代设计的发展)。

综上所述, 现代设计理论和方法的种类繁多, 但并不是任何一件产品和一项工程的设计都需要采用全部设计方法, 也不是每个产品零件或电子元件的设计均能采用上述每一种方法。由于不同的产品都有各自的特点, 所以设计时常需综合运用上述设计方法。如突变论方法学中的各种创造性设计法; 智能论方法学中的计算机辅助设计; 优化论方法学中的优化设计法; 信息论方法学中的预测技术法、信息处理技术; 对应论方法学中的相似设计法、科学类比法、模拟设计法; 艺术论方法学中的工业造型设计法、人机工程学; 寿命论方法学中的价值工程与价值创新等, 都是经常需要用到的。

1.2.2 现代设计方法的特点

现代设计方法的基本特点如下:

1) 程式性: 研究设计的全过程。要求设计者从产品规划、方案设计、技术设计、施工设计到试验、试制进行全面考虑, 按步骤有计划地进行设计。

2) 创造性: 突出人的创造性, 发挥集体智慧, 力求探寻更多突破性方案, 开发创新产品。

3) 系统性: 强调用系统工程处理技术系统问题。设计时应分析各部分的有机关系, 力求系统整体最优。同时考虑技术系统与外界的联系, 即人-机-环境的大系统关系。

4) 最优性: 设计的目的是得到功能全、性能好、成本低的价值最优的产品。设计中不仅考虑零部件参数、性能的最优, 更重要的是争取产品的技术系统整体最优。

5) 综合性: 现代设计方法是建立在系统工程、创造工程基础上, 综合运用信息论、优化论、相似论、模糊论、可靠性理论等自然科学理论和价值工程、决策论、预测论等社会科学理论, 同时采用集合、矩阵、图论等数学工具和电子计算机技术, 总结设计规律, 提供多种解决设计问题的科学途径。

6) 数字性: 将计算机全面地引入设计。通过设计者和计算机的密切配合, 采用先进的设计方法, 提高设计质量和速度。计算机不仅用于设计计算和绘图, 同时在信息储存、评价决策、动态模拟、人工智能等方面将发挥更大作用。

最后, 应该指出, 设计是一项涉及多种学科、多种技术的交叉工程。它既

需要方法论的指导，也依赖于各种专业理论和专业技术，更离不开技术人员的经验和实践。现代设计理论与方法是在继承和发展传统设计理论与方法的基础上融会新的科学理论和新的科学技术成果而形成的。因此，学习使用现代设计理论与方法，并不是要完全抛弃传统的方法和经验，而是要让广大设计人员在传统方法和实践经验的基础上掌握一把新的思想钥匙。所以，不能把现代设计与传统设计截然分开，传统设计方法在一些适合的工业产品设计中还在有效应用。

1.3 现代产品的设计类型及进程

1.3.1 现代产品的特点与设计要求

随着科学和技术的飞速发展，现代产品的特点主要表现在广泛采用现代新兴技术，并对产品的功能、可靠性、效益提出更为严格的要求。当前许多高技术产品如激光测量装置、航天飞机、核动力设备等大量诞生，无一不是采用现代新兴技术的结果；而常规产品如机床、纺织机械、工程机械、电视机等电器也都大量采用了新技术，如数字控制、气动纺纱、液压技术、数字信号等。这些说明先进的科技成就正在源源不断地通过设计改变着产品。

新兴技术对产品的渗透、改造和应用，使产品的功能和结构产生很大的变化。如机械加工中出现电子束、等离子束、激光和电磁成形等新技术，用以加工高强度合金钢、精细陶瓷等；而涂层刀、单晶金刚石使切削金属的能力倍增，给机床设计提出新的要求；甲醇发动机、太阳能发动机及电磁发动机的出现，为新的能源利用创造出新的途径；机械产品中日益普遍地采用微机作自动控制，发展为机械-电子-信息一体化技术及产品；如此等等。这些新兴技术促使机械产品在功能上的大跨越，成为现代产品最突出的特点。

由于科学技术的飞速发展，使新的设计领域不断开辟，如现时出现了芯片设计、基因设计、微型机械设计等新领域，同时新技术不断涌现，又促进了经济的高速发展。而这些又促使了企业间的竞争日益激烈，且这种竞争已成为世界范围内技术水平、经济实力的全面竞争。此外，加之现代机械日益向大型化、高速化、精密化和高效化方向发展，所有这些又对工业产品与工程设计提出了新的要求，具体表现为以下几个方面：

- 1) 设计对象由单机走向系统；
- 2) 设计要求由单目标走向多目标；
- 3) 设计所涉及的领域由单一领域走向多个领域；
- 4) 承担设计工作的人员从单人走向小组；

- 5) 产品更新速度加快, 使设计周期缩短;
- 6) 产品设计由自由发展走向有计划的发展;
- 7) 设计的发展要适应科学技术的发展, 特别是适应计算机技术的发展。

因而, 科技的发展和时代的进步, 不仅对工业产品的要求也愈来愈高, 同时也对设计人员的水平和素质提出了更高的要求。面对这一形势, 唯一的出路就是: 设计必须科学化、现代化。也就要求设计人员不仅要有丰富的专业知识, 而且还需掌握先进的设计理论、设计方法、设计手段及工具, 科学地进行设计工作, 这样才能设计出符合时代要求的新产品。

1.3.2 现代产品的设计类型及进程

产品设计是形成工业产品的第一道工序。要设计好一个现代产品, 除需掌握现代科技和现代设计理论与方法外, 还应了解产品设计过程的一般规律和设计程序。

1. 现代产品的设计类型

现代产品设计按其创新程度可分为以下三种类型:

1) 开发性设计。它是在全部功能或主要功能的实现原理和结构未知的情况下, 运用成熟的科学技术成果所进行的新型工业产品的设计。也就是针对新任务, 应用可行的新技术, 进行创新构思, 提出新的功能原理方案, 完成从产品规划到施工设计。这是一种完全创新的设计。例如赶超先进水平, 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。

2) 适应性设计。在主功能的实现原理或者结构方案保持基本不变的情况下, 只对产品作局部变更或增设部件, 使产品能更广泛地适应使用要求的设计。例如在卧式铣床基础上加设立铣头、磨头或插削头, 以扩展铣床的加工范围; 又如在普通自行车基础上, 更换传动系统, 并改变部分结构后开发的变速赛车等。

3) 变型设计。在功能原理和功能结构都保持不变的情况下, 变更现有产品的结构配置和尺寸, 使之满足不同的工作要求的设计。例如不同压力、流量的齿轮泵系列设计, 以及 22, 24, 26, 28 英寸不同尺寸规格的自行车设计等。

在工业产品设计中, 开发性设计目前所占比重不大。但开发性产品能有冲击旧产品, 迅速占领市场的良好效果, 因此开发性设计一般效益高, 风险大。而为满足市场多品种, 多规格产品之需要, 适应性设计和变型设计则受到人们的普遍重视。

2. 现代产品设计的三个阶段

任何一种产品的开发，都要面对市场竞争的考验。要使产品受到市场的接受和欢迎，产品开发必须经历功能原理设计、实用化设计和商品化设计三个重要阶段。

1) 功能原理设计。产品的功能原理设计就是针对产品的某一确定的功能要求，寻找一些实现该功能目标的解法原理。其实质就是进行产品原理方案的构思与拟定的过程。因此，设计时，必须从最新的自然科学原理及其技术效应出发，通过创新构思，优化筛选，寻求最适宜于实现预定功能目标的原理方案。为此需运用创新思维方法并借鉴前人有效的设计经验，把设计要求通过功能关系抽象为一简单的模式，去寻求能满足产品主要功能要求的原理方案。

功能原理设计通常是以简图或示意图来进行方案构思的，图中所示的构件的结构、形状以及材料等，一般还不可能有成熟的考虑，但应指出，功能原理设计是一个形象思维与逻辑推理的过程，是实现创新和开发的关键阶段，它的优劣，是从质的方面决定了产品设计的水平。

2) 实用化设计。功能原理设计仅是提出实现各种功能要求的原理方案图，这与产品的生产用图还有很大的距离，其间有很多的工作要做，其中关键的工作就是将原理方案结构化，即确定完成功能要求所需零件的材料、形状、尺寸、加工方法及总体布局。简言之，实用化设计就是使原理方案构思转化为具有实用水平的装置。完成从总体设计、部件设计、零件设计到制造施工的全部技术资料。

3) 商品化设计。一个产品要成为商品，要保证产品在市场竞争中成功，必须具备一定的条件。这些条件概括地讲，包括技术方面的、经济方面的和社会方面的等。这几方面的条件实质上就是对一个产品的评价标准。因此，商品化设计就是从技术、经济、社会等各方面来提高产品的市场竞争能力。例如用价值优化进行价值分析，提高产品性能，降低成本，用最低成本保证基本功能。又如对产品进行造型设计，在保证功能和便于加工的前提下，设计美观大方的外形和协调悦目的色彩。

3. 现代产品设计的进程

现代产品设计的进程一般可分为产品规划（决策）、原理方案设计、技术设计和施工设计四个阶段：

1) 产品规划阶段。该阶段就是进行待开发产品的需求分析、市场预测、可行性分析，确定设计参数及制约条件，最后提出详细的设计任务书（或设计要求表），作为设计、评价和决策的依据。

对产品开发中的重大问题经过技术、经济、社会各方面条件的详细分析和对开发可能性的综合研究,提出产品开发的可行性报告。报告内容一般包括:①产品开发的必要性,市场调查及预测情况;②有关产品的国内外水平,发展趋势;③技术上预期所能达到的水平,经济效益和社会效益的分析;④设计、工艺等方面需要解决的关键问题;⑤投资费用及开发时间进度;⑥现有条件下开发的可能性及准备采取的措施等。产品规划阶段的最终目的是确定任务,并给出详细的设计任务书(设计要求表)。

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。在功能分析的基础上通过创新构思,优化筛选,求取较理想的功能原理方案,列表给出原理参数,并作出新产品的功能原理方案图。

方案设计阶段是产品设计中的一个重要阶段。它将决定产品性能、成本,关系到产品水平及竞争能力。该阶段应有表达功能原理方案的简图或示意图。

3) 技术设计阶段。该阶段是将新产品的最优功能原理方案具体化为装置及零部件的合理结构。相对于方案设计阶段的创新设计,技术设计阶段有更多反映设计规律的合理化设计要求。这个阶段工作内容较广。首先是总体设计,应按照人-机-环境-社会的合理要求,对产品各部分的位置、运动、控制等进行总体布置。然后分为同时进行的实用化设计和商品化设计两条设计路线,分别进行结构设计(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造型方案。分别经过试验和评价,选出最优结构方案和最优造型方案。最后分别得出结构设计技术文件、总体装置草图、结构装配草图和造型设计技术文件、总体效果草图、外观构思模型。必须指出,以上两条设计路线的每一步骤,都必须相互交流相互补充,而不是完成了结构设计再进行造型设计,最后完成的图纸和文件所表示的是统一的新产品。

技术设计阶段应提供出新产品的总装图、结构装配图和造型图。

4) 施工设计阶段。施工设计是把技术设计的结果变成施工的技术文件。该阶段就是完成零件工作图、部件装配图、造型效果图、设计说明书、工艺文件、使用说明书等有关技术文件。

以上产品设计进程的四个阶段,应尽可能地实现 CAD/CAM 一体化,从而提高设计效率,加快设计进度。并对各阶段中的具体设计内容要在各种现代设计理论指导下,用不同的现代设计方法来完成。

1.4 学习现代设计方法的意义和任务

如上所述,设计是人类改造自然的基本活动之一,设计是复杂的思维过程,设计过程蕴含着创新和发明机会。设计的目的是把预定的目标、经过一系列规划

与分析决策,产生一定的信息(文字、数据、图形),形成设计,并通过制造,使设计成为产品,造福于人类。

当前我国正在进行宏伟的社会主义现代化建设,国民经济各部门迫切需要质量好、效率高、消耗低、价格便宜的先进的工业产品。而产品设计是决定产品性能、质量、水平和经济效益的重要一环。同时,随着我国加入WTO,实现全球经济一体化,我国的工业产品将不断进入国际市场。产品是否具有竞争能力,在很大程度上取决于产品的设计,因为产品设计工作的水平会直接影响产品的质量和效益。在这种新形势下,唯有提高产品质量才能参与国际竞争。为此,在产品设计中就必须大力推广目前在国外已经广泛应用的先进设计理论与方法,以提高我国的设计水平,使之既能缩短产品的设计周期,又可提高产品的质量,降低其成本。因此,作为面向21世纪的未来的设计工程师——今日的工科大学生,学习和掌握现代设计理论与方法就具有特别的意义。

设计人员是新产品的重要创造者,对产品的发展有重大影响。为了适应当代科学技术发展的要求和市场经济体制对设计人才的需要,必须加强设计人员的创新能力和素质的培养,现代设计理论与方法课程的开设就是为此目的进行的。通过对这门课程的学习与研究,以期提高未来从事设计工作人员的设计水平,增强创新设计能力。

应该指出,现代设计是过去设计活动的延伸和发展。现代设计方法也是在传统设计方法基础上不断吸收现代理论、方法和技术以及相邻学科最新成就后发展起来的。所以,今天学习现代设计方法,其目的绝不是要完全抛弃传统方法和经验,而是要使广大同学们在掌握传统方法实践经验的基础上再掌握一把新的思想钥匙和技术手段。

学习现代设计方法这门课程的任务是:

1) 通过学习,了解现代设计理论与方法的基本原理和主要内容,掌握各种设计方法的设计思想、设计步骤及上机操作要领,以提高自己的设计素质,增强创新设计能力。

2) 通过学习,在同学们充分掌握现代设计方法理论的基础上,力求在未来产品设计实践的工作过程中,能够不断地发展现代设计理论与方法,甚至发明和创造出新的现代设计方法和手段,以推动人类设计事业的进步。随着现代科学和技术的飞速发展,新的设计理论与方法也在不断地诞生。

习 题

1-1 试述设计的含义,工业产品设计具有哪些特征?

1-2 人类设计活动的发展经历了哪几个阶段?试述各阶段的基本特征。

1-3 在半理论半经验设计阶段所取得的重要进展有哪几方面?

- 1-4 何为传统设计、现代设计？现代设计的主要特点表现在哪几方面？
- 1-5 传统设计和现代设计之间的区别在哪几方面？并说明这两种设计之间的正确关系。
- 1-6 简述现代设计理论和方法的主要组成部分及其特点。
- 1-7 试述现代产品的特点。
- 1-8 简述现代产品设计的基本类型及特点，并说明现代产品设计的基本进程。
- 1-9 试述学习现代设计方法这门课程的意义与任务。

第 2 章 优化设计

2.1 概 述

2.1.1 优化设计基本概念

优化设计 (optimal design) 是 20 世纪 60 年代随着计算机的广泛使用而迅速发展起来的一种现代设计方法。它是最优化技术和计算机技术在计算领域中应用的结果。优化设计能为工程及产品设计提供一种重要的科学设计方法,使得在解决复杂设计问题时,能从众多的设计方案中寻得尽可能完善的或最适宜的设计方案,因而采用这种设计方法能大大提高设计质量和设计效率。

目前,优化设计方法在机械、电子电气、化工、纺织、冶金、石油、航空航天、航海、道路交通及建筑等设计领域都得到了广泛的应用,而且取得了显著的技术、经济效果。特别是在机械设计中,对于机构、零件、部件、工艺设备等的基本参数,以及一个分系统的设计,都有许多优化设计方法取得良好的经济效果的实例。实践证明,在机械设计中采用优化设计方法,不仅可以减轻机械设备自重,降低材料消耗与制造成本,而且可以提高产品的质量与工作性能,同时还能大大缩短产品设计周期。因此,优化设计已成为现代设计理论和方法中的一个重要领域,并且愈来愈受到广大设计人员和工程技术人员的重视。

所谓优化设计,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设计方案。进行最优化设计时,首先必须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。

优化设计过程一般分为如下四步:

1) 设计课题分析:首先确定设计目标,它可以是单项指标,也可以是多项设计指标的组合。从技术经济观点出发,就机械设计而言,机器的运动学和动力学性能、体积与总量、效率、成本、可靠性等,都可以作为设计所追求的目标。然后分析设计应满足的要求,主要的有:某些参数的取值范围;某种设计性能或指标按设计规范推导出的技术性能;还有工艺条件对设计参数的限制等。

2) 建立数学模型:将实际设计问题用数学方程的形式予以全面、准确地描

述,其中包括:确定设计变量,即哪些设计参数参与优选;构造目标函数,即评价设计方案优劣的设计指标;选择约束函数,即把设计应满足的各类条件以等式或不等式的形式表达。建立数学模型要做到准确、齐全这两点,即必须严格地按各种规范作出相应的数学描述,必须把设计中应考虑的各种因素全部包括进去,这对于整个优化设计的效果是至关重要的。

3) 选择优化方法:根据数学模型的函数性态、设计精度要求等选择使用的优化方法,并编制出相应的计算机程序。

4) 上机计算择优:将所编程序及有关数据输入计算机,进行运算,求解得最优值,然后对所算结果作出分析判断,得到设计问题的最优设计方案。

上述优化设计过程的四步其核心是进行如下两项工作:一是分析设计任务,将实际问题转化为一个最优化问题,即建立优化问题的数学模型;二是选用适用的优化方法在计算机上求解数学模型,寻求最优设计方案。

2.1.2 优化设计的数学模型

下面通过三个简单的优化设计实例,说明优化数学模型的一般形式及其有关概念。

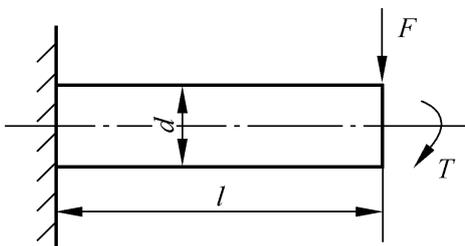


图 2-1 圆形等截面销轴

例 2-1 如图 2-1 所示,有一圆形等截面的销轴,一端固定,一端作用着集中载荷 $F=10000\text{N}$ 和转矩 $T=100\text{N}\cdot\text{m}$ 。由于结构需要,轴的长度 l 不得小于 8cm ,已知销轴材料的许用弯曲应力 $[\sigma_w]=120\text{MPa}$,许用扭转切应力 $[\tau]=80\text{MPa}$,允许挠度 $[f]=0.01\text{cm}$,密度 $\rho=7.8\text{t/m}^3$,弹性模量 $E=2\times 10^5\text{MPa}$ 。现要求在满足使用要求的条件下,试设计一个用料最省(销轴质量最轻)的方案。

解:根据上述问题,该销轴的力学模型是一个悬臂梁。设销轴直径为 d ,长度为 l ,体积为 V ,则该问题的物理表达式如下:

(1) 销轴用料最省(即体积最小):

$$V = \frac{1}{4} \pi d^2 l \rho \rightarrow \min$$

可见销轴用料取决于其直径 d 和长度。这是一个合理选择 d 和 l 而使体积 V 最小的优化设计问题。

(2) 满足的条件:

① 强度条件。

弯曲强度式

$$\sigma_{\max} = \frac{Fl}{0.1d^3} \leq [\sigma_w]$$

扭转强度式

$$\tau = \frac{T}{0.2 d^3} \leq [\tau]$$

② 刚度条件。

挠度表达式

$$f = \frac{Fl^3}{3EJ} = \frac{64 Fl^3}{3E\pi d^4} \leq [f]$$

③ 结构尺寸边界条件。

$$l \geq l_{\min} = 8\text{cm}$$

将题意的有关已知数值代入，按优化数学模型的规范形式，可归纳为如下数学模型：

设

$$x_1 = d, \quad x_2 = l$$

设计变量

$$X = [d \quad l]^T = [x_1 \quad x_2]^T$$

目标函数的极小化

$$\min f(X) = V = \frac{1}{4} \pi d^2 l \rho = \frac{1}{4} \pi x_1^2 x_2 \rho = 0.785 x_1^2 x_2$$

约束条件

$$g_1(X) = 8.33l - d^3 = 8.33x_2 - x_1^3 \leq 0 \quad (\text{弯曲强度条件})$$

$$g_2(X) = 6.25 - d^3 = 6.25 - x_1^3 \leq 0 \quad (\text{扭转强度条件})$$

$$g_3(X) = 0.34l^3 - d^4 = 0.34x_2^3 - x_1^4 \leq 0 \quad (\text{刚度条件})$$

$$g_4(X) = 8 - l = 8 - x_2 \leq 0 \quad (\text{长度的边界条件})$$

综上所述，这是一个具有 4 个约束条件的二元非线性的约束优化问题。

例 2-2 现用薄钢板制造一体积为 5m^3 ，长度不小于 4m 的无上盖的立方体货箱。要求该货箱的钢板耗费量最少，试确定货箱的长、宽和高的尺寸。

解：钢板的耗费量与货箱的表面积成正比。设货箱的长、宽、高分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 ，货箱的表面积为 S ，则该问题的物理表达式为

(1) 货箱的钢板耗费量（即货箱的表面积用料）最少。

$$S = x_1 x_2 + 2(x_1 x_3 + x_2 x_3) \rightarrow \min$$

可见货箱的表面积取决于货箱的长度 x_1 、宽度 x_2 和高度 x_3 。

(2) 满足的条件：

$$x_1 \geq 4, \quad x_2 \geq 0, \quad x_3 \geq 0$$

按优化数学模型的规范形式，可归纳为如下数学模型：

设计变量

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$$

目标函数的极小化

$$\min f(X) = S = x_1 x_2 + 2(x_1 x_3 + x_2 x_3)$$

约束条件

$$g_1(X) = 4 - x_1 \leq 0$$

$$g_2(X) = -x_2 \leq 0$$

$$g_3(X) = -x_3 \leq 0$$

$$h(X) = 5 - x_1 x_2 x_3 = 0$$

由等式约束条件可知，三个设计变量中只有两个是独立变量，即 $x_3 = \frac{5}{x_1 x_2}$ 。所以，该问题的优化数学模型应写为：

设计变量

$$X = [x_1 \quad x_2]^T$$

目标函数的极小化

$$\min f(X) = x_1 x_2 + 2(x_1 x_3 + x_2 x_3) = x_1 x_2 + 10 \left[\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_1} \right]$$

约束条件

$$g_1(X) = 4 - x_1 \leq 0$$

$$g_2(X) = -x_2 \leq 0$$

$$h(X) = 5 - x_1 x_2 x_3 = 0$$

例 2-3 某车间生产甲、乙两种产品。生产甲种产品每件需使用 9kg 材料、3 个工时、4kW·h 电，可获利润 60 元。生产乙种产品每件需用 4kg 材料、10 个工时、5kW·h 电，可获利 120 元。若每天能供应 360kg 材料、300 个工时、200kW·h 电。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。

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。

设每天生产的甲、乙两种产品分别为 x_1 ， x_2 件，每天获得的利润可用函数 $f(x_1, x_2)$ 表示，即

$$f(x_1, x_2) = 60x_1 + 120x_2 \rightarrow \max$$

每天实际消耗的材料、工时和电力可分别用以下约束函数表示：

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

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

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

于是上述生产计划问题的优化数学模型应写为：

设计变量

$$X = [x_1 \quad x_2]^T$$

目标函数的极小化

$$\min f(X) = f(x_1, x_2) = -60x_1 - 120x_2$$

约束条件

$$g_1(X) = 9x_1 + 4x_2 \leq 360 \quad (\text{材料约束})$$

$$g_2(X) = 3x_1 + 10x_2 \leq 300 \quad (\text{工时约束})$$

$$g_3(X) = 4x_1 + 5x_2 \leq 200 \quad (\text{电力约束})$$

$$g_4(X) = -x_1 \leq 0$$

$$g_5(X) = -x_2 \leq 0$$

由于目标函数和所有约束函数均为设计变量的线性函数，故此问题属线性约束优化问题。

从以上三个实例可以看出，优化设计的数学模型需要用设计变量、目标函数和约束条件等基本概念才能予以完整的描述，可以写成以下统一形式：

求设计变量

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (2-1)$$

使极小化函数

$$f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2-2)$$

满足约束条件

$$g_u(X) \leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, m)$$

$$h_v(X) = 0 \quad (v = 1, 2, \dots, p; p < n)$$

其中， $g_u(X) \leq 0$ 称为不等式约束条件， $h_v(X) = 0$ 称为等式约束条件。

用向量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 表示设计变量， $X \in R^n$ 表示向量 X 属于 n 维实欧氏空间，用 \min 、 \max 表示极小化和极大化，s. t. (subjected to 的英文缩写) 表示“满足于”， m 、 p 分别表示不等式约束和等式约束的个数。优化数学模型可以写成以下向量形式：

$$\begin{aligned} & \min f(X), \quad X \in R^n \\ & \text{s. t.} \quad g_u(X) \leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$h_v(X) = 0 \quad (v = 1, 2, \dots, p; p < n)$$

式 (2-3) 就是优化数学模型的一般表达式。这一优化数学模型，称为约束优化设计问题。若式 (2-3) 所列数学模型内 $m = p = 0$ ，则成为

$$\min f(X), \quad X \in R^n \quad (2-4)$$

这一优化问题不受任何约束，称为无约束优化设计问题。式(2-4)即为无约束优化问题的数学模型表达式。

当涉及问题要求极大化 $f(X)$ 目标函数时，只要将式中目标函数改写为 $-f(X)$ 即可。因为 $\min f(X)$ 和 $\max[-f(X)]$ 具有相同的解。同样，当不等式约束为“ ≥ 0 ”时，只要将不等式两端同乘以“-1”，即可得到“ \leq ”的一般形式。

一个完整的规格化的优化数学模型应包含有三部分内容：即设计变量 X 、目标函数 $f(X)$ 、约束条件 $g_u(X) \leq 0$ 和 $h_v(X) = 0$ 。它们又称为优化数学模型的三要素。

建立出的优化数学模型，在计算机上求得的解称为优化问题的最优解，它包括：

最优方案

$$X^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$$

最优目标函数值

$$f(X^*)$$

即优化问题的最优解由最优设计方案 X^* （或称最优点）和最优目标函数值 $f(X^*)$ 两部分组成，最优目标函数值 $f(X^*)$ 是最优点 X^* 带入目标函数 $f(X)$ 所求得的最优函数值，它是评价设计方案优劣程度的一个标量值。

1. 设计变量

在优化设计过程中需要调整和优选的参数，称为设计变量。如在工程及工业产品设计中，一个零部件或一台机器的设计方案，常用一组基本参数来表示。概括起来参数可分为两类：一类是按照具体设计要求事先给定，且在设计过程中保持不变的参数，称为设计常量；另一类是在设计过程中须经不断调整，以确定其最优值的参数，则为设计变量。也就是说，设计变量是优化设计要优选的量。优化设计的任务，就是确定设计变量的最优值以得到最优设计方案。

由于设计对象不同，选取的设计变量也不同。它可以是几何参数：如零件外形尺寸、截面尺寸、机构的运动尺寸等；也可以是某些物理量：如零部件的重量、体积、力与力矩、惯性矩等；还可以是代表工作性能的导出量：如应力、变形等。总之，设计变量必须是对该项设计性能指标优劣有影响的参数。

设计变量是一组相互独立的基本参数。一般用向量 X 来表示。设计变量的每一个分量都是相互独立的。以 n 个设计变量为坐标轴所构成的实数空间称为设计空间，或称 n 维实欧式空间，用 R^n 表示。当 $n=2$ 时， $X=[x_1, x_2]^T$ 是二维设计向量；当 $n=3$ 时， $X=[x_1, x_2, x_3]^T$ 为三维设计向量，设计变量 $x_1, x_2,$

x_3 组成一个三维空间；当 $n > 3$ 时，设计空间是一个想像的超越空间，称 n 维实属空间。其中二维和三维设计空间如图 2-2 所示。

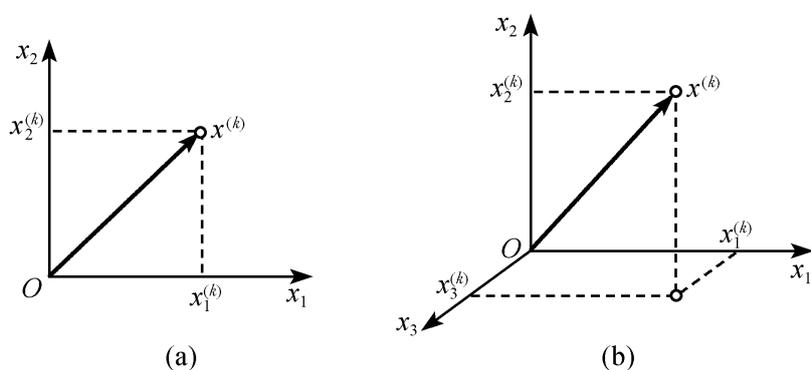


图 2-2 设计空间

设计空间是所有设计方案的集合，用符号 $X \in R^n$ 表示。任何一个设计方案，都可以看作是从设计空间原点出发的一个设计向量 $X^{(k)}$ ，该向量端点的坐标值就是这一组设计变量 $X^{(k)} = [x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_n^{(k)}]^T$ 。因此，一组设计变量表示一个设计方案，它与一向量的端点相对应，也称设计点。而设计点的集合即构成了设计空间。

根据设计变量的多少，一般将优化设计问题分为三种类型：当设计变量数目 $n < 10$ 的称为小型优化问题； $n = 10 \sim 50$ 的称为中型优化问题； $n > 50$ 的称为大型优化问题。

在工程优化设计中，根据设计要求，设计变量常有连续量和离散量之分。大多数情况下，设计变量是有界连续变化型量，称为连续设计变量。但在一些情况下，有些设计变量是离散型量，则称离散设计变量，如齿轮的齿数、模数、钢管的直径、钢板的厚度等。对于离散设计变量，在优化设计过程中常是先把它视为连续量，再求得连续量的优化结果后再进行圆整或标准化，以求得一个实用的最优设计方案。

2. 目标函数

目标函数又称评价函数，是用来评价设计方案优劣的标准。任何一项机械设计方案的好坏，总可以用一些设计指标来衡量，这些设计指标可表示为设计变量的函数，该函数就称为优化设计的目标函数。 n 维设计变量优化问题的目标函数记为 $f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。它代表设计中某项最重要的特征，如机械零件设计中的重量、体积、效率、可靠性、承载能力，机械设计中的运动误差、动力特性，产品设计中的成本、寿命等。

目标函数是一个标量函数。目标函数值的大小，是评价设计质量优劣的标准。优化设计就是要寻求一个最优设计方案，即最优点 X^* ，从而使目标函数达

到最优值 $f(X^*)$ 。在优化设计中，一般取最优值为目标函数的最小值。

确定目标函数，是优化设计中最重要决策之一。因为这不仅直接影响优化方案的质量，而且还影响到优化过程。目标函数可以根据工程问题的要求从不同角度来建立，例如：成本、重量、几何尺寸、运动轨迹、功率、应力、动力特性等。

一个优化问题，可以用一个目标函数来衡量，称之为单目标优化问题；也可以用多个目标函数来衡量，称之为多目标优化问题。单目标优化问题，由于指标单一，易于衡量设计方案的优劣，求解过程比较简单明确；而多目标优化问题求解比较复杂，但可获得更佳的最优设计方案。

目标函数可以通过等值线（面）在设计空间中表现出来。所谓目标函数的等值线（面），就是当目标函数 $f(X)$ 的值依次等于一系列常数 $c_i (i=1, 2, \dots)$

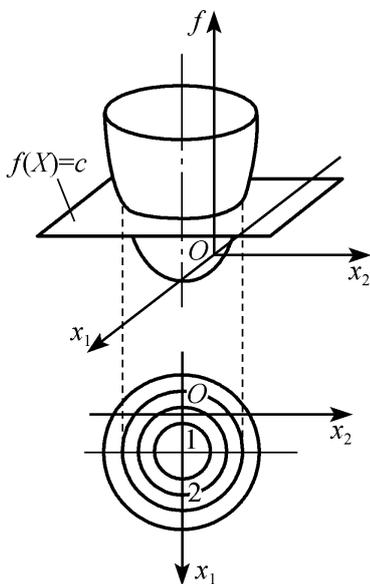


图 2-3 二维目标函数等值线

时，设计变量 X 取得一系列值的集合。现以二维优化问题为例，来说明目标函数的等值线（面）的几何意义。如图 2-3 所示，二维变量的目标函数 $f(x_1, x_2)$ 图形可以用三维空间描述出来。令目标函数 $f(x_1, x_2)$ 的值分别等于 a, c, \dots ，则对应这些设计点的集合是在 $x_1 O x_2$ 坐标平面内的一族曲线，每一条曲线上的各点都具有相等的目标函数值，所以这些曲线称为目标函数的等值线。由图可见，等值线族反映了目标函数值的变化规律，等值线越向里面，目标函数值越小。对于有中心的曲线族来说，等值线族的共同中心就是目标函数的无约束极小点 X^* 。故从几何意义上来说，求目标函数无约束极小点也就是求其等值线族的共同中心。

以上二维目标函数等值线的讨论，可以推广到多维问题的分析中去。对于三维问题在设计空间中是等值面问题；高于三维问题在设计空间中是超等值面问题。

3. 约束条件

设计空间是一切设计方案的集合，只要在设计空间确定一个点，就确定了一个设计方案。但是，实际上并不是任何一个设计方案都可行，因为设计变量的取值范围有限制或必须满足一定的条件。在优化设计中，这种对设计变量取值时的限制条件，称为约束条件（或称设计约束）。如前述销轴直径 d 和长度 l 的选取，就是约束的例子。

按照约束条件的形式不同，约束有不等式和等式约束两类，一般表达式为

$$g_u(X) \leq 0 \quad (u = 1, 2, \dots, m)$$

$$h_v(X) = 0 \quad (v = 1, 2, \dots, p; p < n)$$