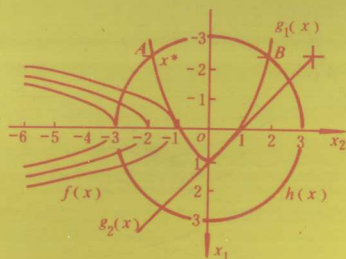


叶元烈 苏智剑 杨双挥 祁建中 主编

现代设计方法概论

XIANDAI
SHEJIFANGFA
GAILUN



XDSJFAGL

河南科学技术出版社

TB21
105

现代设计方法概论

XIANDAI SHEJIFANGFAGAILUN

苏智剑

杨双挥

祁建中

主编

河南科学技术出版社

内 容 提 要

本书着重地介绍了当前我国正在推广应用的几种现代设计方法的理论和实践。全书分四章,第一章机械优化设计,重点讲述了机械工程设计问题的优化数学模型的建立和常用的无约束、约束最优化方法,同时简要介绍了数学理论基础。第二章机械可靠性设计,简述了可靠性数学基础、可靠性指标以及机械可靠性设计。第三章计算机辅助设计(CAD),讲解了计算机辅助绘图、工程数据库及数据处理的技能与方法。第四章设计方法学,介绍了系统化设计、创造思维及技法 and 评价方法。内容翔实,深入浅出,简明易懂。各章中实例颇多,每章后均有习题,以加深书文理解。

本书可作为工科院校机械设计及制造自学考试专业用教材、函授生教材,也可作为工程技术人员的培训教材以及研究生、本科生的参考读物。

现代设计方法概论

叶元烈 苏智剑 主编

杨双挥 祁建中

责任编辑 孟庆云

河南科学技术出版社出版发行

(郑州市农业路73号 邮编:450002)

郑州工业大学印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 7.125印张 175千字

1996年9月第1版 1996年9月第1次印刷

印数 1-3180

ISBN7-5319-1867-7/T·374

定价:15.00元

前 言

不断发展的新技术,在一切科学技术领域向传统观念提出了挑战。在机械设计领域,用科学的设计代替经验的类比的设计方法已势在必行。缩短设计周期、提高设计质量、发展设计理论、改进设计技术和方法就成为当前机械设计领域中的重要研究内容之一。

设计是人类改造自然的基本活动之一,产品设计要经历复杂的思维过程和技术活动。在计算机出现以前,人们把各种产品设计的经验总结成有关的设计理论、设计步骤、设计方法等,这些统称为传统设计方法。其特点是:人工试凑、经验类比、以静态为假设条件、设计者和制造者分离。但传统设计方法在长期实践中积累了大量成熟和宝贵经验,为现代设计的发展打下了坚实的基础,也就是现代设计是传统设计的延伸和发展。

60年代以来,国际上先进工业国家竞相研究和应用新的设计方法(即现代设计方法),如设计方法学、机械优化设计、机械可靠性设计、计算机辅助设计、工业艺术造型设计、有限元分析法、模块化设计、相似性设计、系统化设计、模态设计、动态设计、疲劳设计、三次设计等。大大提高了设计水平和设计效率。现代设计方法与传统设计方法相比,其特点是:将经验、类比法设计提高到逻辑的、理性的、系统的新设计方法;是在静态分析的基础上,考虑载荷谱、负载率等随机参量,进行动态多变量的最优化;是从设计中只考虑安全系数来提高产品的可靠性,改为从概率论和统计学方法出发进行可靠性设计;是在产品设计时,在各种限制条件下(如技术、性能、经济指标、制造工艺、使用条件等),运用最优化方法,通过计算

机迭代计算,寻求最佳的设计参数值,而不是传统设计方法凭借设计人员的知识、经验和判断力进行的所谓“自然优化”;是从系统论的观点入手,从人的生理特征和心理特征两个方面考虑人(操作者)、机(单机或系统)、环境三者之间的相互协调关系;是运用系统工程的观点和定型化方法来研究设计过程,重视系统的综合及对性能的定量描述,做到分析、综合、评价、决策的逻辑思维;是充分运用电子计算机及其语言,自动进行计算机辅助设计。

随着国民经济的高速发展和改革开放的深入以及我国在关贸总协定中缔约国地位的恢复,国内外用户对机械产品的质量与技术水平将提出更高的要求,而产品设计是决定产品质量、性能、经济效益和竞争能力的首要环节。为此,原机械电子工业部于1989年下达《加强机电产品设计工作的规定》的通知,明确指出我国的差距主要表现在设计基础数据缺乏,设计规范、手册陈旧,骨干设计人员知识老化,设计方法落后,对不少先进产品的设计还没有掌握。要求有步骤、有计划地推广现代设计方法,并作为机械电子工业产品现代设计的考核和验收指标之一。把现代设计方法作为企业技术人员知识更新的培训内容,同时要求有条件的高等院校,要开设“现代设计理论及方法”课程,作为机电类专业学生的必修课程。本书是为了配合推广应用现代设计方法的需要而编写的。

本书分为四章。第一章机械优化设计,由叶元烈执笔;第二章机械可靠性设计,由杨双挥、祁建中执笔;第三章计算机辅助设计,由苏智剑执笔;第四章设计方法学,由叶元烈执笔;限于编者的水平和经验,不足之处敬请读者指正。

编者

1996年5月

目录

第一章 机械优化设计	(1)
§ 1-1 概述	(1)
一、优化设计在工程设计中的作用	(1)
二、优化设计应用实例	(2)
三、优化设计数学模型的建立	(3)
四、优化设计问题的几何描述	(12)
五、优化设计的基本解法	(15)
§ 1-2 一维优化方法	(18)
一、函数的单峰区间及其确定	(18)
二、一维搜索的基本思想及方法分类	(22)
三、黄金分割法(俗称 0.618 法)	(24)
四、二次插值法	(26)
§ 1-3 无约束优化方法	(32)
一、概述	(32)
二、坐标轮换法	(33)
三、Powell 法	(38)
四、应用举例	(43)
§ 1-4 约束优化方法	(46)
一、约束坐标轮换法	(46)
二、复合形法	(48)
习题	(52)
第二章 机械可靠性设计	(56)

§ 2-1 可靠性的定义及可靠性设计的内容	(56)
§ 2-2 可靠性数学基础	(58)
一、概率 概率的基本运算	(58)
二、总体(母体)与样本	(61)
三、随机变量 随机变量的概率分布及数学特征	(61)
§ 2-3 可靠性特征量及常用概率分布	(64)
一、可靠性特征量及其估计	(64)
二、维纶性和可用性特征量简介	(70)
三、可靠性常用概率分布	(72)
四、产品典型失效率分布	(77)
§ 2-4 系统可靠性设计	(78)
一、系统可靠性预测	(78)
二、系统可靠性分配	(84)
§ 2-5 概率设计	(90)
一、概率设计的特点	(90)
二、概率设计的原理和模型	(92)
三、工作应力概率分布参数的确定	(96)
四、强度概率分布参数的确定	(98)
五、概率设计举例	(101)
习题	(109)
第三章 机械计算机辅助设计	(115)
§ 3-1 总论	(115)
一、CAD 技术的发展概况	(115)
二、CAD 系统的组成和分类	(120)
三、机械 CAD 系统的功能和优点	(122)
四、CAD 技术的发展趋势	(125)
§ 3-2 机械产品的建模方法	(126)

一、二维模型与工程绘图	(127)
二、三维线框、三维曲面和实体模型	(128)
三、特征模型	(128)
四、生物模型	(129)
五、机械产品的电子定义	(130)
§ 3-3 数据结构与设计资料的程序化	(131)
一、概述	(131)
二、线性表和栈	(132)
三、树和二叉树	(135)
四、图	(141)
五、数据结构应用举例	(146)
六、数据管理技术	(148)
七、设计资料的常用处理方法举例	(150)
§ 3-4 工程分析	(156)
一、机械动态设计	(157)
二、计算机仿真与模拟分析	(159)
§ 3-5 专家系统与智能 CAD	(165)
一、概述	(166)
二、LISP 语言	(168)
三、知识表示	(169)
四、求解策略和常用推理方法	(171)
五、机械设计专家系统的设计与开发	(173)
习题	(175)
第四章 设计方法学	(177)
§ 4-1 概述	(177)
一、设计方法学研究的内容	(177)
二、设计系统	(178)
§ 4-2 系统化设计	(186)

一、技术系统	(186)
二、功能分析法	(187)
§ 4-3 创造性思维和方法	(199)
一、设计的实质在于创造	(200)
二、创造性思维	(200)
三、创造性技法	(205)
§ 4-4 评价方法	(208)
一、评价目标	(208)
二、评价方法	(210)
三、技术—经济评价方法	(215)
习题	(217)
参考文献	(221)

第一章 机械优化设计

§ 1—1 概述

一、优化设计在工程设计中的作用

优化设计是现代设计方法的重要内容之一。它以数学规划为理论基础,以电子计算机为工具,在充分考虑多种设计约束的前提下,寻求满足预定目标的最佳设计。

优化设计能比较好地把现代设计理论和经过长期实践验证的设计内容结合起来。这种技术在设计领域中具有巨大的应用潜力。它的推广应用,对促进我国设计工作现代化,将起到良好的作用。

一般工程设计问题都有许多种可行的设计方案。如何根据设计任务和要求,从众多的可行方案中,寻求一个最好的方案,即最优方案,是设计工作者的首要任务。要完成这样一个困难的任务,必须掌握可靠的先进设计方法。

然而,长期以来,机械设计工作者一直沿用着经验类比的设计方法。这种传统设计方法的设计过程可概括为“设计—分析—再设计”的过程,即首先根据设计任务及要求进行调查研究和搜集有关资料,参照已完成的相同或类似任务现有的较为成熟的设计方案,凭借设计者的经验,辅以必要的分析计算,确定一个合适的设计方案,并通过估算,初步确定有关参数;然后对初定方案进行必要的分析及校核计算;如果某些设计要求得不到满足,则可进行设计方案的修改,设计参数的调整,并再一次进行分析及校核计算。如此

多次反复,直到获得满意的设计方案为止。显然,这个设计过程是人工试凑与类比分析的过程,不仅需要花费较多的设计时间,增长设计周期,而且只限于在少数几个候选方案中进行分析比较。

随着电子计算机技术的发展与应用,50年代发展起来的以线性规划与非线性规划为主要内容的新的数学分支——数学规划被应用于解决工程设计问题,形成了工程设计的新理论和新方法,即工程优化设计理论与方法。

优化设计理论和方法用于工程设计是在60年代后期开始的,我国则从70年代中期才开始有关研究。20余年的工程优化设计理论与方法的研究与实践,使传统的工程设计方法发生了根本性变革,从而把经验的、感性的、类比的传统设计方法转变为科学的、理性的、立足于计算分析的设计方法。特别是近年来,随着有限元素法、可靠性设计、计算机辅助设计(CAD)的理论与方法的发展及与优化设计方法的结合应用,使整个工程设计过程逐步向自动化、集成化、智能化发展,其前景是令人鼓舞的。因而,工程设计工作者必须适应这种发展变化,学习、掌握和应用优化设计理论与方法。

二、优化设计应用实例

例 1—1 镗刀杆(销轴)结构参数优化。

如图 1—1 所示。刀杆自由端作用有集中载荷(切削阻力) $P=10000\text{N}$,扭矩 $M=100\text{N}\cdot\text{m}$,悬臂伸出长度不小于 80mm ,已知材料的许用弯曲应力 $[\sigma]=120\text{N}/\text{mm}^2$,许用扭转剪应力 $[\tau]=80\text{N}/\text{mm}^2$,允许挠度 $[f]=0.1\text{mm}$,弹性模量 $E=200000\text{N}/\text{mm}^2$ 。试在满足强度、刚度条件下,设计一个用料最省的方案。

解:根据上述问题,其物理表达式为:

1. 用料最省,即体积最小

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

2. 满足的条件

强度条件: 弯曲强度式

$$\sigma_{Fmax} = \frac{Pl}{0.1d^3} \leq [\sigma]_F$$

扭转强度式

$$\tau_{min} = \frac{M}{0.2d^3} \leq [\tau]$$

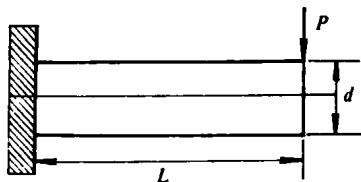


图 1-1

刚度条件: 挠度表达式 $f = \frac{Pl^3}{3EJ} = \frac{64Pl^3}{3E\pi d^4} \leq [f]$

结构尺寸边界条件: $l \geq l_{min} = 80mm$

将题意的有关已知值代入, 按优化数学模型的规范形式, 归纳为下述数学模型:

设 $x_1 = d$, $x_2 = l$

设计变量 $X = [x_1 \quad x_2]^T$

目标函数的极小化 $\min f(X) = \frac{1}{4}\pi x_1^2 x_2 = 0.7854x_1^2 x_2$

约束条件 $g1(X) = [\sigma]_F - \frac{Px_2}{0.1d^3} = 120 - \frac{10^5 x_2}{x_1^3} \geq 0$

或 $g1(X) = x_1^3 - 833.3x_2 \geq 0$

$g1(X) = [\tau] - \frac{M}{0.2d^3} = 80 - \frac{5 \times 10^5}{x_1^3} \geq 0$

或 $g1(X) = x_1^3 - 6250 \geq 0$

$g1(X) = [f] - \frac{64Pl^3}{3E\pi d^4} = 0.1 - \frac{0.34x_2^3}{x_1^4} \geq 0$

或 $g1(X) = x_1^4 - 3.4x_2^3 \geq 0$

$g1(X) = x_2 - l_{min} = x_2 - 80 \geq 0$

注意: (1) 此问题为具有两个设计变量, 四个约束条件的非线性规划问题;

(2) 非线性规划问题的判断是看目标函数和约束函数是否均为线性函数, 若均为线性函数则称为线性规划问题, 若其中之一为非线性函数, 则称为非线性规划问题。

例 1-2 用薄铁板制造一面积为 5m^2 , 长度不小于 4m 的货箱(图 1-2), 要求该货箱的钢板耗用量最少, 试确定货箱的长、宽和高的尺寸。

钢板的耗用量与货箱的表面积成正比。

如果货箱不带上盖, 设货箱长、宽、高分别为 x_1, x_2, x_3 , 则可写出下述数学模型:

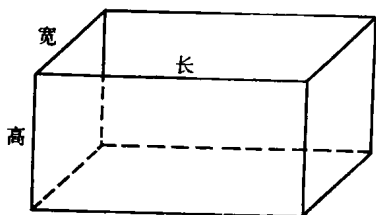


图 1-2

设计变量 $X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$

目标函数的极小化 $\min f(X) = x_1x_2 + 2(x_1x_2 + x_1x_3)$

约束条件 $g_1(X) = x_1 - 4 \geq 0$ $g_2(X) = x_2 \geq 0$ $g_3(X) = x_3 \geq 0$, $h(X) = x_1x_2x_3 - 5 = 0$ 由等式约束可知, 三个设计变量中只有两个是独立参变量, 即 $x_3 = 5/x_1x_2$ 。该问题的优化数学模型应写为:

$$\begin{aligned} X &= [x_1 \ x_2]^T \\ \min f(X) &= x_1x_2 + 2(x_1x_2 + x_1x_3) \\ &= x_1x_2 + 10(1/x_2 + 1/x_1) \\ \text{s.t. } g_1(X) &= x_1 - 4 \geq 0 \\ g_2(X) &= x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

注意: (1) 构造优化数学模型时, 设计变量的确定应是独立参数。从本例分析可知: 若有一个等式约束, 则在原则上可以减少一个设计变量, 当然这时被消除的那个设计变量必须以显式的形式表达出来。

(2) 约束条件 $g_2(X) = x_2 \geq 0$, 是表示设计变量不得取为负值, 否则优化结果无实用价值。在工程设计的优化数学模型的编制时应引起注意。

例 1-3 螺栓组联接的优化。

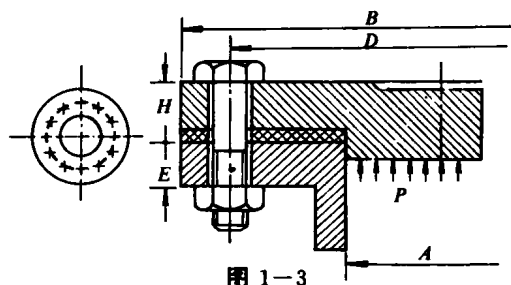


图 1-3

图 1-3 所示为一压力容器,该容器缸体与缸盖间有密封垫,采用普通螺栓将其联接。现需从安全、可靠、经济的角度来选择螺栓的个数和确定螺栓的尺寸。

设计分析:(1)从经济性考虑,螺栓数量少些、尺寸小些为好,但数量少会影响容器的密封性、尺寸小强度低,不能保证安全可靠的工作;(2)从安全、可靠考虑,螺栓数量多一些、尺寸大一些为好,显然经济性差,且会造成安装扳手空间过小,操作困难。为此,该问题的设计思想应是:在保证工作安全、可靠的前提下,尽量降低成本。

根据上述分析,该问题可归纳为如下的数学模型:

设计变量 $X = [x_1 \ x_2]^T = [d \ n]^T$

d ——螺栓直径 n ——螺栓个数

目标函数 全部螺栓的总成本最低

$$C_n = n \cdot c$$

C_n ——全部螺栓的总成本(元)

c ——单个螺栓的价格(元)

单个螺栓价格是由材料及螺栓尺寸规格所决定的,其值应在社会调查统计的基础上,进行回归分析得到。表 1-1 所示的是材料为 35 号钢,长度为 50mm,半精制螺栓的单价:

表 1-1 半精制螺栓单价

直径 d(mm)	10	12	14	16	18	20	...
单价 c(元)	0.052	0.091	0.142	0.172	0.228	0.251	...

根据表 1-1 数据画出成本 C —直径 d 的点列,如图 1-4 所示。点列分布可用直线近似描述。运用线性回归分析可得 d — c 关系式:

$$c = 0.205d - 0.1518$$

由此可得螺栓总成本:

$$C_n = n(0.205d - 0.1518)$$

约束条件:

(1)强度条件:保证在工作压力 p 作用下,能安全、可靠地工作。

设单个螺栓允许的轴向载荷为 F ,

则有

$$K \frac{\pi A^2}{4} p \leq nF, \text{ 或 } nF - K \frac{\pi A^2}{4} p \geq 0$$

式中 K ——安全系数, $K > 1$

单个螺栓允许的轴向载荷在同一材料时,只与螺栓直径有关。如 35 号钢的螺栓见表 1-2。

由表 1-2 可画出 F — d 的点列,用指数函数 $F = ad^b$ 近似描述,经回归分析,对有预紧力的螺栓可得:

$$a = 7.0630201, \quad b = 2.1135369$$

故得单个螺栓允许的轴向载荷的表达式:

$$F = 7.0630201d^{2.1135369}$$

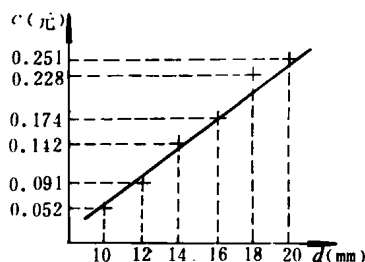


图 1-4

则有强度约束条件 $7.0630201nd^{2.1135369} - K \frac{\pi A^2}{4} p \geq 0$

表 1—2

螺栓直径 d(mm)		6	8	10	12	16	20	24	...
许用轴向 载荷 F(Kg)	无预紧	400	740	1180	1720	3300	5200	7500	...
	有预紧	310	580	920	1320	2500	4000	5800	...

(2)安装条件:保证扳手空间及压力容器的密封性。为保证必要的扳手空间,螺栓间距不应小于 5 倍的螺栓直径;为保证联接的密封性,螺栓间距不应大于 10 倍的螺栓直径。

$$\text{即} \quad \frac{\pi D}{n} - 5d \geq 0 \quad 10d - \frac{\pi D}{n} \geq 0$$

设 x_1 表示螺栓直径 d , x_2 表示螺栓个数 n 。根据上述分析可写成规范化优化数学模型:

$$\text{设计变量} \quad X = [x_1 \quad x_2]^T$$

$$\text{目标函数极小化} \quad \min f(X) = x_2(0.0205x_1 - 0.1518)$$

约束条件

$$g_1(X) = 7.0630201x_2x_1^{2.1135369} - K \frac{\pi A^2}{4} p \geq 0$$

$$g_2(X) = \pi D/x_2 - 5x_1 \geq 0$$

$$g_3(X) = 10x_1 - \pi D/x_2 \geq 0$$

$$g_4(X) = x_1 \geq 0$$

$$g_5(X) = x_2 \geq 0$$

注意: (1)本例优化数学模型表达的问题是二个设计变量,五个约束条件的非线性规划问题;

(2)本例的设计变量均为离散性整数,故该问题又属整数规划问题;

(3)本例在构造目标函数和第一个约束函数时,无法引用现成的公式,是利用观测值进行回归分析(或称曲线拟合)获得经验表

达式。

例 1—4 综合优化一个四杆机构以实现给定的连杆曲线(图 1—5)。

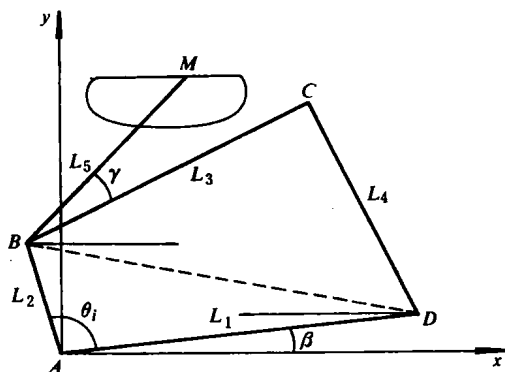


图 1—5

连杆上 M 点的轨迹给定坐标值:

表 1—3

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
XX_i	26	23	20	17	14	10	20	30
YY_i	16	16	16	16	16	13	7	13
$\Delta\theta_i$	0	22	44	66	88	129	221	314

目标函数的建立可采用坐标误差的均方根值最小

$$\min F(X) = \left\{ \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 [(XX_i - XM_i)^2 + (YY_i - YM_i)^2] \right\}^{1/2}$$

式中的 XX_i 和 YY_i 可由图 1—5 推出:

$$XX_i = l_2 \cos \theta_i + l_5 \cos \Psi_i + x_A$$

$$YY_i = l_2 \sin \theta_i + l_5 \sin \Psi_i + y_A$$

$$\theta_i = \theta_1 + \Delta\theta_i$$

$$\Psi_i = \gamma + \eta_i - (\epsilon_i - \beta)$$