

新世纪高校工程规划教材

机械优化设计

主讲人：于涛

机械优化设计

- 第一章 优化设计概述
- 第二章 优化措施的数学基础
- 第三章 一维搜索措施
- 第四章 无约束优化措施
- 第五章 约束优化措施
- 第六章 线性规划
- 第七章 多目的及离散变量优化措施简介
- 第八章 优化设计过程中应注意的问题
- 第九章 当代优化计算措施

第一章 优化设计概述

§ 1-1 绪论

§ 1-2 优化设计问题的示例

§ 1-3 优化设计的数学模型

§ 1-4 优化问题的几何解释和基本解法

§1-1 绪论

一. 优化

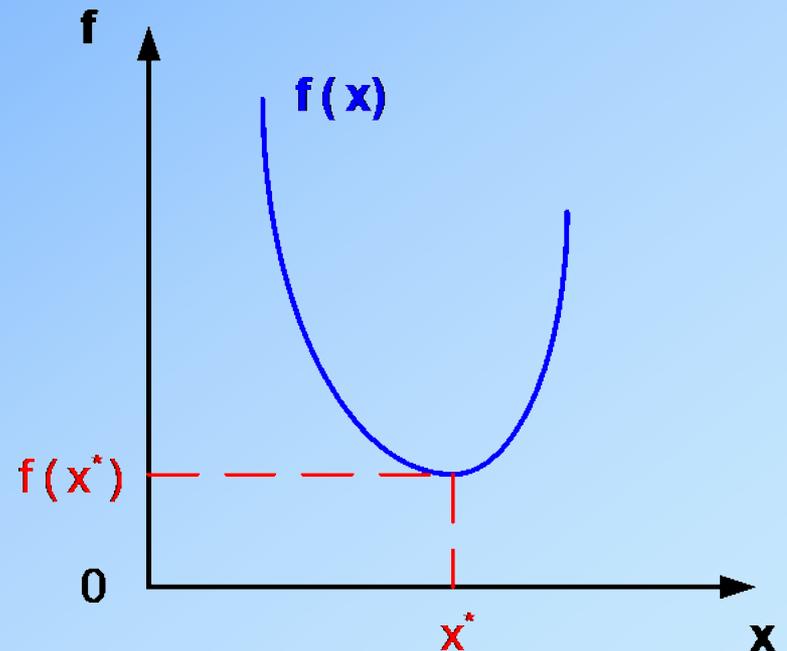
最优值 (Optimum) 最优化的简称为 Opt.

1. 优化

在要求的范围内 (或条件下), 寻找给定函数取得的最大值 (或最小值) 的条件。

例如, 在右图中, 求得一维函数 $f(x)$ 最小值的条件为: 若 x 取 x^* , 则 $f(x)$ 取得最小值 $f(x^*)$ 。

目的是为了在完毕某一任务时所作的努力至少、付出最小, 而使其收益最大、效果最佳。



2. 优化过程

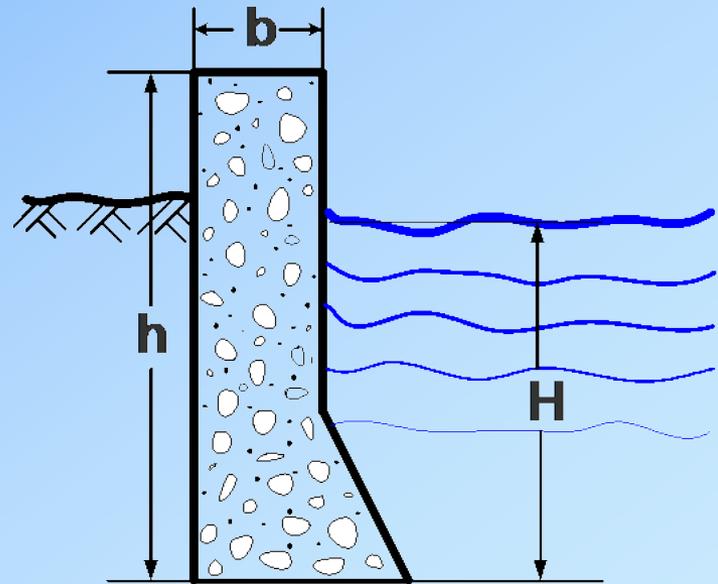
优化的过程是一种决策的过程。

例如，要求设计一种如右下图所示的防洪堤坝。为了能防洪水，高度必须足以确保洪峰到来时，洪水不会漫入堤岸；堤坝的强度足以确保巨浪不会冲毁堤坝。同步希望得到一种省时省力省经费的设计方案。

优化过程就是求解一种付出的努力最小、取得效益最大的方案。

取得设计方案的过程是一种决策的过程，也是优化的过程。

所作的努力或希望的效益在实际问题中均可体现为某些决策变量的函数。



3. 优化措施

- 实际问题体现成的**函数类型**诸多：
 - 拟定型、不拟定型函数；
 - 线形、非线形（二次、高次、超越）函数。
- **变量类型**也诸多：连续、离散、随机变量等等。
- 求解问题的**优化措施**也诸多，最常用的为数学规划法，它是运筹学的一部分。而运筹学是数学的一种分支。
- 产生诸多的**优化算法**：
 - 无约束优化、约束优化；
 - 单目的函数优化、多目的函数优化；
 - 连续变量优化、离散变量优化、随机变量优化。

二. 优化设计

1. 老式设计 with 优化设计

老式设计：求得 可行解。

优化设计：解得 最优解。

2. 优化设计 with 最优控制

优化利用在设计领域 —— 优化设计

优化利用在控制领域 —— 最优控制

3. 优化设计利用于各领域

土木工程、水利工程、城市规划、化工系统、电气系统、电子产品、机械产品.....

优化利用于机械产品的设计，称机械优化设计。

例如，古代人类在生产和生活活动中经过无多次探索认识到，在使用一样数量和质量材料的条件下，圆截面的容器比其他任何截面的容器能够盛放的谷物都要多，而且容器的强度也最大。

优化是万物演化的自然选择和必然趋势。优化作为一种观念和意向，人类从很早开始就一直在自觉与不自觉地追求与探索。而优化作为一门学科与技术，则是一切科学与技术所追求的永恒主题，旨在从处理多种事物的一切可能的方案中，谋求最优的方案。优化的原理与措施，在科学的、工程的和社会的实际问题中的应用，便是优化设计。

优化设计是在当代计算机广泛应用的基础上发展起来的一项新技术。是根据最优化原理和措施，以人机配合方式或“自动探索”方式，在计算机上进行的半自动或自动设计，以选出在既有工程条件下的最佳设计方案的一种当代设计措施。

优化设计反应出人们对于设计规律这一客观世界认识的深化。

最优化设计是在数学规划措施的基础上发展起来的，是60年代初电子计算机引入构造设计领域后逐渐形成的一种有效的设计措施。利用这种措施，不但使设计周期大大缩短，计算精度明显提升，而且能够处理老式设计措施所不能处理的比较复杂的最优化设计问题。大型电子计算机的出现，使最优化措施及其理论蓬勃发展，成为应用数学中的一种主要分支，并在许多科学技术领域中得到应用。

近十几年来，最优化设计措施已陆续用到建筑构造、化工、冶金、铁路、航天航空、造船、机床、汽车、自动控制系统、电力系统以及电机、电器等工程设计领域，并取得了明显效果。其中在机械设计方面的应用虽尚处于早期阶段，但也已经取得了丰硕的成果。一般说来，对于工程设计问题，所涉及的原因愈多，问题愈复杂，最优化设计成果所取得的效益就愈大。

三. 机械优化设计

1. 老式机械设计理论与措施

疲劳寿命理论、强度理论、振动理论.....

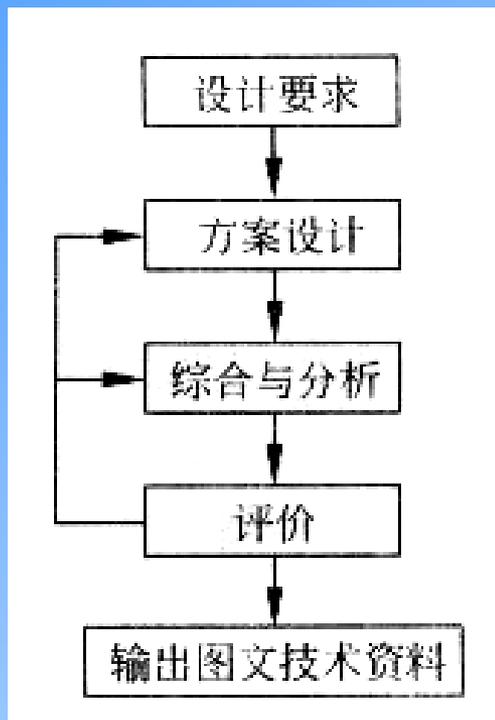
常凭经验、试算、校核等措施。

2. 当代机械设计理论与措施

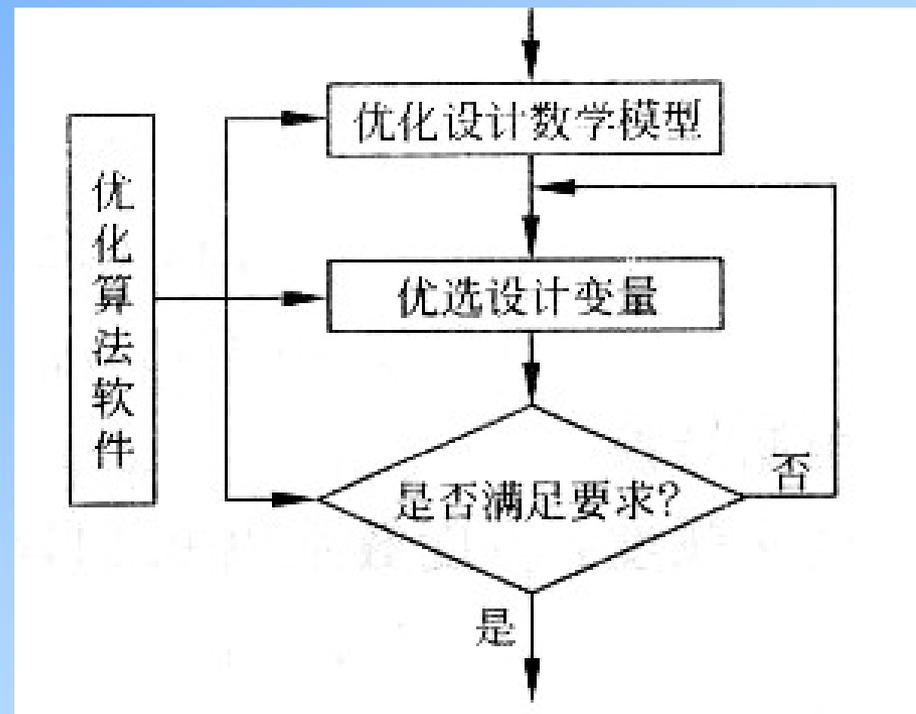
60年代出现：计算机辅助设计CAD、有限单元法、可靠性设计、**优化设计**、设计措施学、价值工程、反求工程.....

90年代出现：并行设计、虚拟设计、仿生设计、协同设计.....

机械优化设计 就是把机械设计与优化设计理论及措施相结合，借助电子计算机，自动寻找实现预期目的的最优设计方案和最佳设计参数。



常规设计流程



优化设计流程

3. 机械优化设计的发展

古典优化思想：17世纪发明微积分中的极值问题。

经典优化设计：20世纪40年代起，数学规划论和计算机技术的发展使最优化设计计算成为可能。

优化设计从无约束→有约束优化问题；连续变量→离散变量；拟定型→随机型模型；单目的优化→多目的优化。

当代优化设计：20世纪80年代出现许多当代优化算法：模拟退火算法、遗传算法、人工神经网络算法、蚁群优化算法等。

并从狭义优化设计（零部件参数）转向广义优化设计（面对产品的全系统、设计全过程、全寿命周期）。例如，针对涉及多领域复杂系统的多学科设计优化。

例如，工厂在安排生产计划时，首先要考虑在既有原材料、设备、人力等资源条件下，怎样安排生产，使产品的产值最高，或产生的利润最大；又如，在多级火箭发射过程中，怎样控制燃料的燃烧速率，从而用火箭所载的有限燃料使火箭到达最大升空速度；再如，在城市交通管理中，怎样控制和引导车辆的流向，尽量降低各个交叉路口的阻塞和等待时间、提升各条道路的车辆通行速度，在既有道路条件下取得最大的道路通行能力。

机械优化设计应用实例

美国波音飞机企业对大型机翼用138个设计变量进行构造优化，使重量降低了三分之一；大型运送舰用10个变量进行优化设计，使成本降低约10%。

实践证明，最优化设计是确保产品具有优良的性能，减轻自重或体积，降低产品成本的一种有效设计措施。同步也可使设计者从大量繁琐和反复的计算工作中解脱出来，使之有更多的精力从事发明性的设计，并大大提升设计效率。

4. 机械优化设计的作用

- 使老式机械设计中，求解可行解上升为求解最优解成为可能；
- 使老式机械设计中，性能指标的校核能够不再进行；
- 使机械设计的部分评价，由定性改定量成为可能；
- 使零缺陷（废品）设计成为可能；
- 大大提升了产品的设计质量，从而提升了产品的质量。

四. 本课程的任务

优化设计是一种当代设计措施，是很好的工具。

基础：（1）最优化数学理论

（2）当代计算技术

内容：（1）将工程实际问题数学化；

（建立优化设计数学模型）

（2）用最优化计算措施在计算机上求解数学模型。

§ 1-2 优化设计问题的示例

优化设计就是借助最优化数值计算措施与计算机技术，求取工程问题的最优设计方案。

优化设计涉及：

(1) 必须将实际问题加以数学描述，形成数学模型；

(2) 选用合适的一种最优化数值措施和计算程序运算求解。

箱盒的优化设计

例1-1 已知：制造一体积为 100m^3 ，长度不不大于于 5m ，不带上盖的箱盒，试拟定箱盒的长 x_1 ，宽 x_2 ，高 x_3 ，使箱盒用料最省。

分析：

- (1) 箱盒的表面积的体现式；
- (2) 设计参数拟定：长 x_1 ，宽 x_2 ，高 x_3 ；
- (3) 设计约束条件：
 - (a) 体积要求；
 - (b) 长度要求；

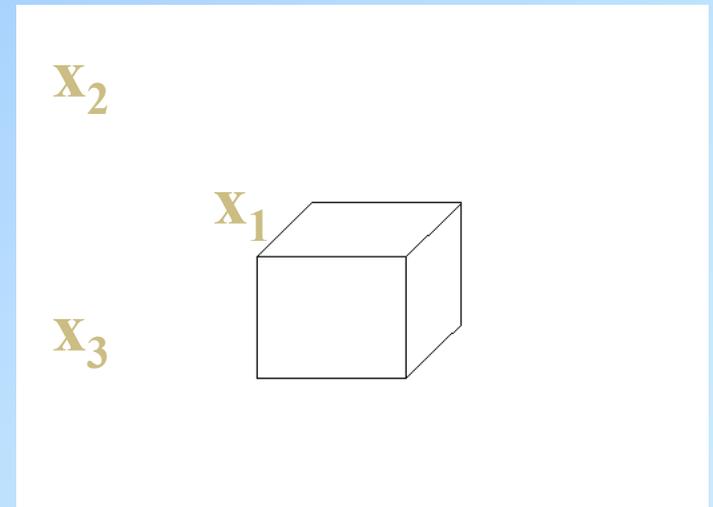


图 1-1 箱盒例图

数学模型

设计参数: x_1, x_2, x_3

设计目的: $\min S = x_1x_2 + 2(x_2x_3 + x_1x_3)$

约束条件: $x_1 \geq 5$

$$x_2 \geq 0$$

$$x_3 \geq 0$$

$$x_1x_2x_3 = 100$$

-
- **例1-2** 某建筑企业，在 $12023m^2$ 的土地上，建造分别占地 $1012 m^2$ 和 $1617m^2$ 的甲、乙两种住房，甲种不能超出8所，每所可获利润1万元；乙种不能超出4所，每所可获利润2万元。问两种住房各建几所可取得最大利润？

解：设建造甲、乙两种住房的数目分别为

x_1, x_2

目的函数： $y = x_1 + 2x_2$

约束条件：

$$1012x_1 + 1617x_2 \leq 12023$$

$$x_1 \leq 8; \quad x_2 \leq 4; \quad x_1, x_2 \geq 0$$

该问题是在满足不等式约束条件下，使企业取得最大利润的优化设计问题

例1-3圆形等截面销轴受载情况的简化模型

集中载荷 $F=10000N$

扭矩 $M=100N.m$

构造要求轴长度 L 不大于 $80mm$

许用弯曲应力 $[\sigma]=120MPa$

许用剪应力 $[\tau]=80MPa$

允许挠度 $[f]=0.1mm$

密度 $\rho=7.8 t/m^3$

弹性模量 $E=2\times 10^5 Mpa$

求：销轴的质量最轻

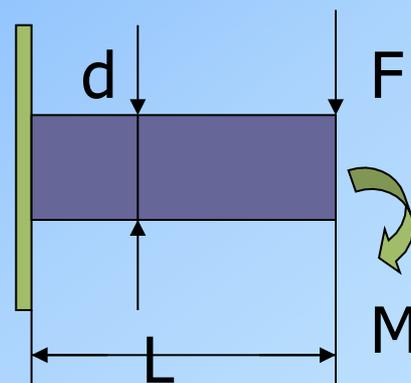


图 1-2 悬臂梁例图

解：销轴质量最轻的目的函数体现式

$$Q = \frac{1}{4} \pi d^2 L \rho$$

限制条件

1. 弯曲强度 最大弯曲应力不得超出许用值 $\sigma_{\max} = \frac{PL}{0.1d^3} \leq [\sigma]$

故： $[\sigma] - \frac{PL}{0.1d^3} \geq 0$

2. 扭转强度 扭转剪应力不得超出许用值 $\tau = \frac{M}{0.2d^3} \leq [\tau]$

故： $[\tau] - \frac{M}{0.2d^3} \geq 0$

3. 刚度 最大挠度不得超出许用值 $f = \frac{PL^3}{3EJ} = \frac{64PL^3}{3\pi Ed^4} \leq [f]$

故： $[f] - \frac{64 PL^3}{3\pi Ed^4} \geq 0$

4. 构造尺寸 悬臂梁的长度不得不大于 $L_{\min} = 80$

故：

$$L \geq L_{\min}$$

✦ 以上实例均为实际问题的优化设计简朴论述。
就是在一定约束条件下，选择合适的参数，并建立优化设计所要求的数学模型，选择合适的优化设计措施，经过计算机运算，才干取得最优设计方案或最优值。

直齿圆柱齿轮副的优化设计

已知：传动比 i , 转速 n , 传动功率 P , 大小齿轮的材料, 设计该齿轮副, 使其重量最轻。

分析:

- (1) 圆柱齿轮的体积(v)与重量(w)的体现;
- (2) 设计参数拟定: 模数 (m), 齿宽 (b), 齿数 (z_1);
- (3) 设计约束条件:
 - (a) 大齿轮满足弯曲强度要求;
 - (b) 小齿轮满足弯曲强度要求;
 - (c) 齿轮副满足接触疲劳强度要求;
 - (d) 齿宽系数要求;
 - (e) 最小齿数要求。

数学模型

设计参数: m, z_1, b

设计目的: $\min W = \frac{\rho}{4} \pi b [(mz_1)^2 + (miz_1)^2]$

约束条件: $\sigma_{F1} - [\sigma]_{F1} \leq 0$

$$\sigma_{F2} - [\sigma]_{F2} \leq 0$$

$$\sigma_H - [\sigma]_{H1} \leq 0$$

$$b - 1.2mz_1 \leq 0$$

$$17 - z_1 \leq 0$$

§ 1-3 优化设计的数学模型

优化设计的数学模型是描述实际优化问题的设计内容、变量关系、有关设计条件和意图的数学体现式，它反应了物理现象各主要原因的内在联络，是进行优化设计的基础。

1. 设计变量

一种设计方案能够用一组基本参数的数值来表达，这些基本参数能够是构件尺寸等几何量，也能够是质量等物理量，还能够是应力、变形等表达工作性能的导出量。

在设计过程中进行选择并最终必须拟定的各项独立的基本参数，称作设计变量，又叫做优化参数。

设计变量的全体实际上是一组变量，可用一种列向量表达。设计变量的数目称为优化设计的维数，如 n 个设计变量，则称为 n 维设计问题。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$$

由 n 个设计变量 x_1, x_2, \dots, x_n 为坐标所构成的实空间称作**设计空间**。一种“设计”，可用设计空间中的一点表达。

按照产品设计变量的取值特点，设计变量可分为**连续变量**（例如轴径、轮廓尺寸等）和**离散变量**（例如多种原则规格等）。

。

只有两个设计变量的二维设计问题可用图1-3 (a) 所示的平面直角坐标表达；有三个设计变量的三维设计问题可用图1-3 (b) 所示的空间直角坐标表达。

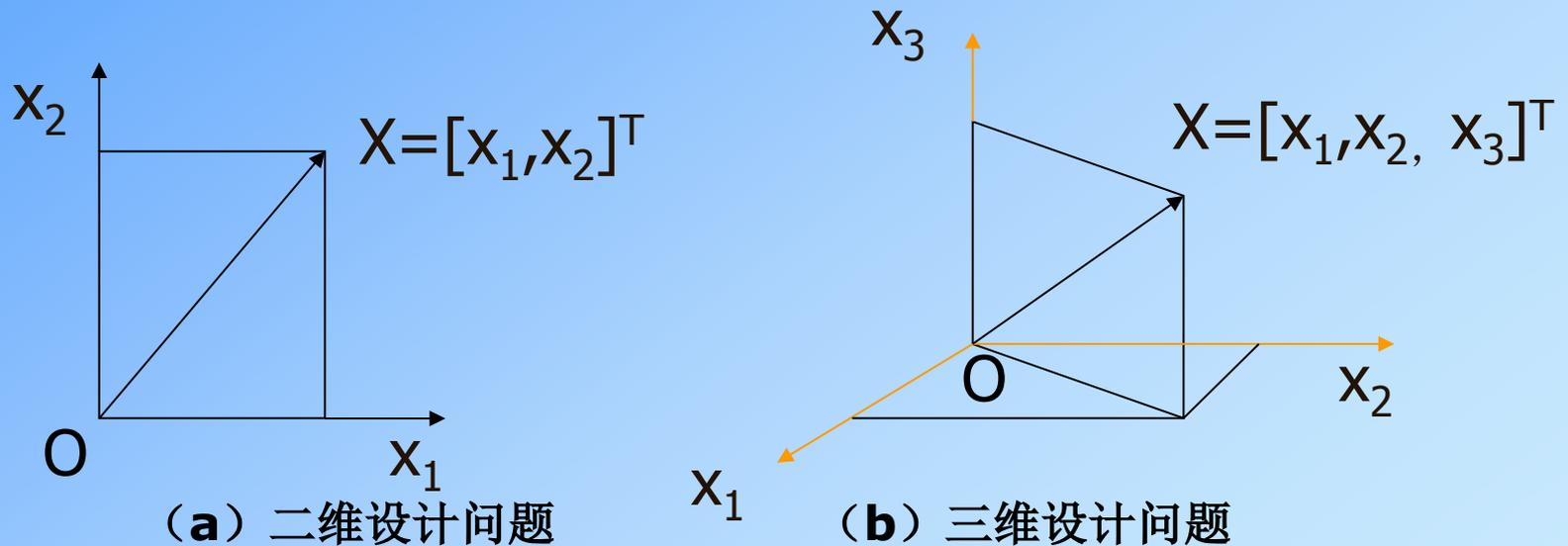


图1-3 设计变量所构成的设计空间

设计空间的维数表征设计的自由度，设计变量愈多，则设计的自由度愈大、可供选择的方案愈多，设计愈灵活，但难度亦愈大、求解亦愈复杂。

小型设计问题：一般具有2-10个设计变量；

中型设计问题：10-50个设计变量；

大型设计问题：50个以上的设计变量。

目前已能处理200个设计变量的大型最优化设计问题。

怎样选定设计变量？

任何一项产品，是众多设计变量标志构造尺寸的综合体。变量越多，能够淋漓尽致地描述产品构造，但会增长建模的难度和造成优化规模过大。所以设计变量时应注意下列几点：

(1) 抓主要，舍次要。

对产品性能和构造影响大的参数可取为设计变量，影响小的可先根据经验取为试探性的常量，有的甚至能够不考虑。

(2) 根据要处理设计问题的特殊性来选择设计变量。

例如，圆柱螺旋拉压弹簧的设计变量有4个，即钢丝直径 d ，弹簧中径 D ，工作圈数 n 和自由高度 H 。在设计中，将材料的许用剪切应力和剪切模量 G 等作为设计常量。在给定径向空间内设计弹簧，则可将弹簧中径 D 作为设计常量。

2. 目的函数

为了对设计进行定量评价，必须构造包括设计变量的评价函数，它是优化的目的，称为目的函数，以 $F(X)$ 表达。

$$F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

在优化过程中，经过设计变量的不断向 $F(X)$ 值改善的方向自动调整，最终求得 $F(X)$ 值最佳或最满意的 X 值。在构造目的函数时，**应注意目的函数必须包括全部设计变量，全部的设计变量必须包括在约束函数中**。在机械设计中，可作为参照目的函数的有：

体积最小、重量最轻、效率最高、承载能力最大、构造运动精度最高、振幅或噪声最小、成本最低、耗能最小、动负荷最小等等。

在最优化设计问题中，能够只有一种目的函数，称为单目的函数。当在同一设计中要提出多种目的函数时，这种问题称为多目的函数的最优化问题。在一般的机械最优化设计中，多目的函数的情况较多。目的函数愈多，设计的综合效果愈好，但问题的求解亦愈复杂。

在实际工程设计问题中，经常会遇到在多目的函数的某些目的之间存在矛盾的情况，这就要求设计者正确处理各目的函数之间的关系。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/668026114133006132>