第十五章、起重机优化设计

- 1 优化设计概述
- 2 优化设计的数学模型
- 3 优化设计问题的基本解法
- 4 优化设计实例

1 优化设计方法概述

1.1 优化设计的概念

优化设计就是以数学规划理论为基础，以计算机为工具，在充分考虑各种设计约束的前提下，寻求满足某些预定目标的最优设计方案。

优化设计 ➡ 专业理论+数学规划论+电子计算机。

1.2 优化方法的发展历史

（1）在上世纪之前，古典极值问题。

（2）二十世纪三十年代末前苏联数学家就提出了线性规划问题。

（3）20世纪40年代初(二战期间)，由于军事运输的需要,产生了运筹学，提出了线性规划的解法。

（4）上世纪五十年代初，H.W.Kuhn和A.W.Tucker提出了非线性规划的基本定理，为非线性规划的发展提供了理论基础。

（5）六十年代最优化方法得到了飞速发展。

- 目前，优化技术已经广泛渗透到工程、经济、电子技术等领域；
- 我国第一本“最优化计算方法程序汇编”于1983年出版；
- 在“六五”和“七五”规划中相继研制了OPB-1优化方法程序库。

1.3 机械优化设计的概念

机械优化设计是使某项机械设计在规定的各种设计限制条件下，优选设计参数，使某项或几项设计指标获得最优值。

工程设计上的“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。

1.4 优化设计的特点

（1）优化设计能使各种设计参数自动向更优的方向进行调整，直至找到一个尽可能完善的或最合适的设计方案 。

（2）利用计算机，能在较短的时间内从大量的方案中选出最优的设计方案。

优化方法不仅用于产品结构的设计、工艺方案的选择，也用于运输路线的确定、商品流通量的调配、产品配方的配比等等。目前，优化方法在机械、冶金、石油、化工、电机、建筑、宇航、造船、轻工等部门都已得到广泛的应用。

2 优化设计的数学模型

优化设计的数学模型，就是描述优化问题的设计内容、变量关系、有关设计条件和优化意图的数学表达式。

建立正确、实用的数学模型是优化设计成败的关键。

优化设计数学模型的三个要素：

- 设计变量
- 目标函数
- 约束条件

2.1 设计变量

设计变量 ⟶ **设计过程中待选择的量。**

在优化过程中，不断进行修改、调整，一直**处于变化的参数**，称为设计变量。

ü ***设计变量应该是互相独立的基本参数。***

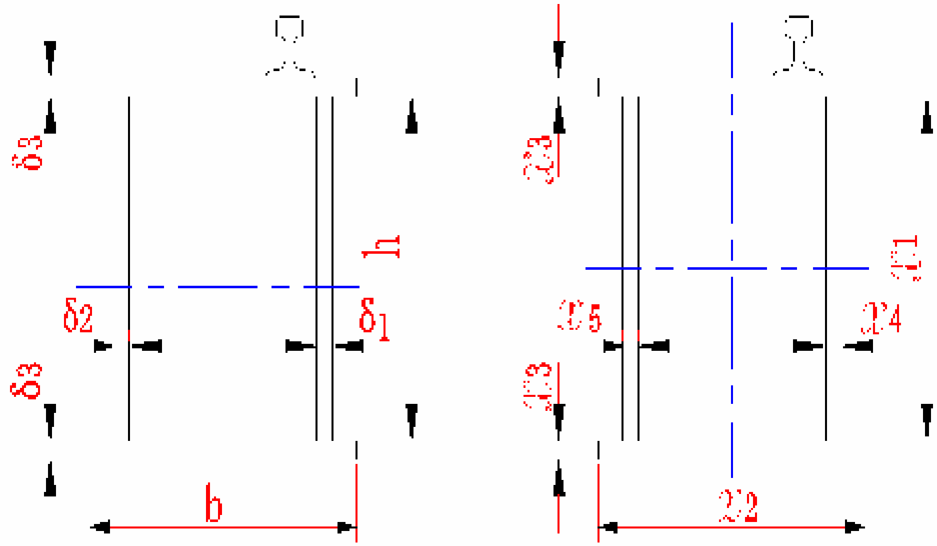
ü 设计变量的个数称为维数。

有n个设计变量的最优化问题，称为n维最优化问题。

$n=2\sim10$ 小型题目
$n=10\sim50$ 中型题目
$n>50$ 大型题目

如桥门式起重机主梁优化设计问题中的设计变量：

$$X=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\\x_5\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}h\\b\\d_3\\d_1\\d_2\end{bmatrix}=[h,b,d_3,d_1,d_2]^T$$



n维设计变量可表示为：

$$X=[x_1,x_2,\mathbf{K},x_n]^T \qquad X\in R^n$$

设计变量分为：连续型和离散型。

对应最优设计方案的点称为最优设计点，表示为：

$$X^*=[x_1^*,x_2^*,\mathbf{K},x_n^*]^T$$

2.2 约束条件

一个可行设计必须满足某些设计限制条件，这些限制条件称作**约束条件**。

约束条件（按性质分）

- 性能约束：由某种性能或指标推导出来的约束条件。
- 边界约束：设计变量的取值范围

按数学表达形式分：

约束条件

- 不等式约束：$g_u(X) \le 0 \quad u = 1,2,\ldots,m$
- 等式约束：$h_v(X) = 0 \quad v = 1,2,\ldots,p \quad p < n$

2.3 目标函数

目标函数是设计变量的函数，是设计中所追求的目标。

目标函数一般记为：

$$F(X)=F(x_1,x_2,\cdots,x_n)$$

通常把优化问题归结为求目标函数极小值问题,即

$$\min F(X) \qquad X\in D\subset R^n$$

*在优化设计中，用目标函数的大小来衡量设计方案的优劣，故目标函数也称为**评价函数**。*

$$\text{目标函数}\begin{cases}\text{单目标优化问题}\\ \text{多目标优化问题}\end{cases}$$

2.4 优化问题的数学模型

优化设计的数学模型是对优化设计问题的数学抽象。

优化设计的数学模型可表示为：

$$
\left.
\begin{array}{lll}
\text{求} & X=[x_1,x_2,\mathbf{K},x_n]^T & X\in R^n \\
\text{使} & \min F(X) & \\
s.t. & g_u(x)\le 0 & u=1,2,...,m \\
 & h_v(x)=0 & v=1,2,...,p<n
\end{array}
\right\}
$$

3 优化设计问题的基本解法

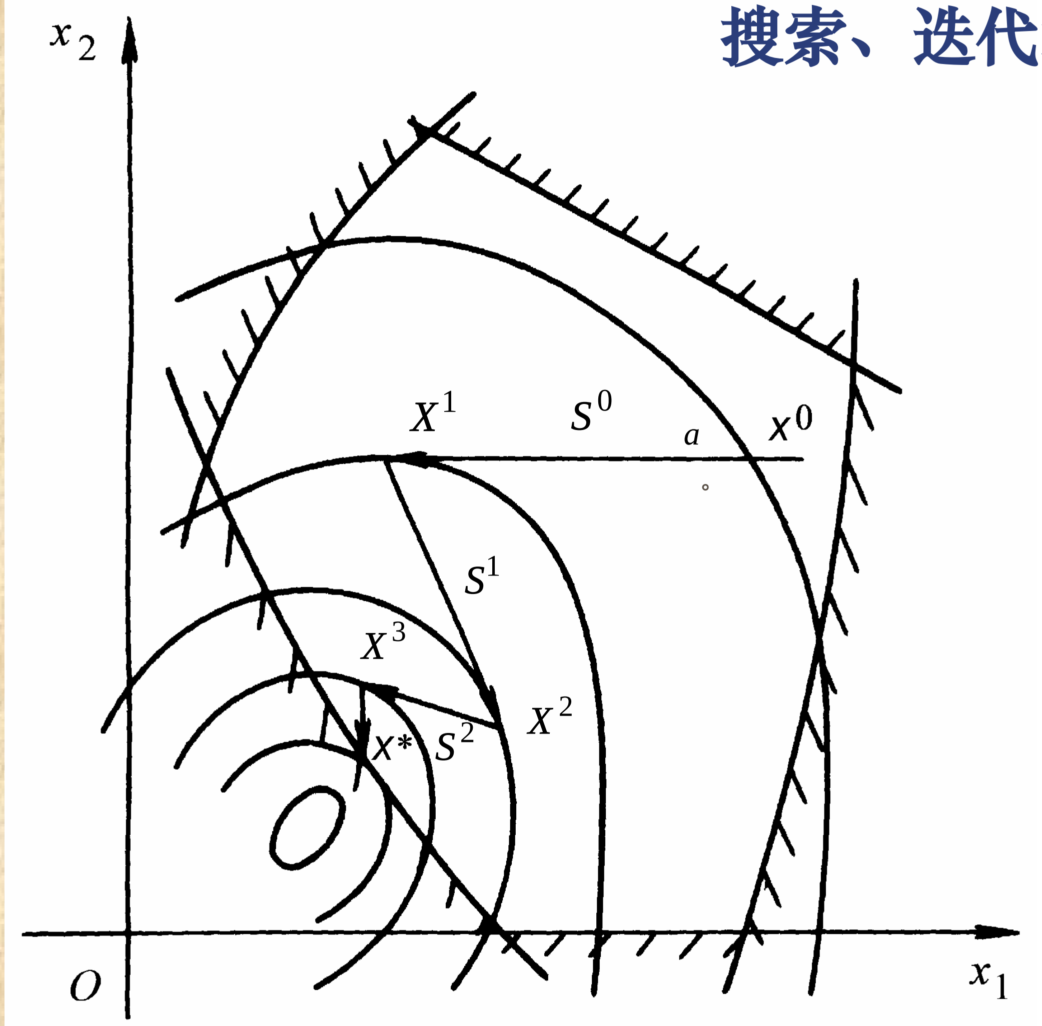
求解优化问题的方法:

解析法: 如微分、变分法等，数学模型复杂时不便求解。

数值法: 通过数值迭代进行近似计算，可以处理复杂函数及没有数学表达式的优化设计问题。

3.1 优化算法的基本思想

搜索、迭代和逼近。



$$X^{k+1} = X^k + a^k S^k$$

应满足:

$$F(X^{k+1}) < F(X^k)$$

关键:

确定搜索方向S和步长α

3.2 一维搜索方法

采用数学规划法求函数极值点的迭代计算：

$$X^{k+1} = X^{k} + a^{k} S^{k}$$

K+1次迭代的搜索方向

搜索的最佳步长因子

当搜索方向S^k给定，求最佳步长a_k 就是求一元函数的极值：

$$F(X^{k} + a^{k} S^{k}) = \min F(X^{k} + a S^{k})$$ 称为一维搜索。

常用一维搜索方法：黄金分割法、二次插值法等。

3.3 非线性约束优化方法

(1)直接算法：如 复合形法、随机方向法、网格法、可行方向法等；

(2)间接算法：如 拉格朗日乘子法、罚函数的内点法、外点法和混合法等。

直接解法是在满足不等式约束的可行设计区域内直接求出问题的约束最优解。

间接解法是将约束优化问题转化为一系列无约束优化问题来解的一种方法。

4 优化设计实例

4.1 求解优化问题的步骤

1) **前期分析**：分析问题，找出要解决的目标，约束条件，并确立最优化的目标。

2) 定义变量，建立最优化问题的**数学模型**，列出目标函数和约束条件。

3) 针对建立的模型,选择合适的求解方法或数学**软件**。

4) **编写程序**，利用计算机**求解**。

5) 对**结果**进行**分析**，讨论诸如：结果的合理性、正确性，算法的收敛性，模型的适用性和通用性，算法效率与误差等。

4.2 集装箱龙门起重机主梁优化设计

已知：

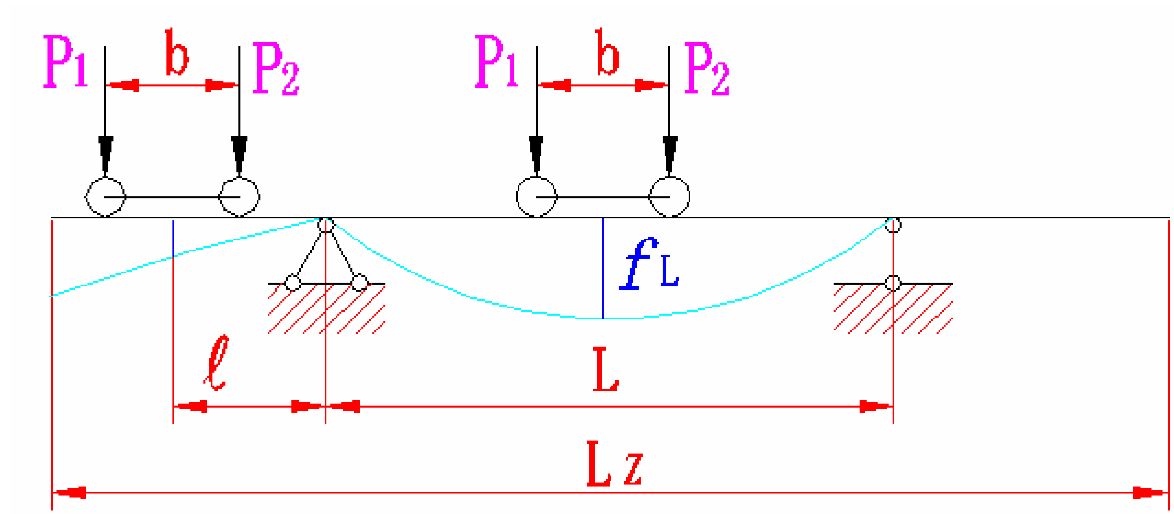
起重量	Q=50t
跨度	L=30m
主梁总长	LZ=55m
有效悬臂长	LY=6.5m
司机室重量	GS=1t,
小车重	Gx=50t,
小车轴距	B=8.6m,
起升速度	Vq=0.2m/s,
大车运行速度	Vd=1m/s
材料	Q235
工作级别	A6

Q235钢许用应力： $[s] = 235/1.34 = 175MPa$

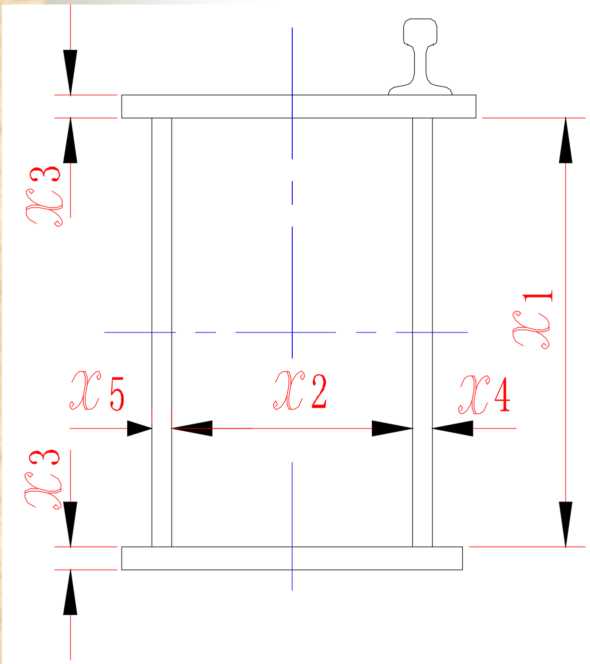
跨中许用挠度 $[f_L] = L/800 = 37.5mm$

有效悬臂端用挠度 $[f_y] = Ly/350 = 18.57mm$

跨中动刚度 $2Hz \le [f]_D \le 4Hz$



主梁优化设计的数学模型



求 $\mathbf{X}=[x_1,x_2,\ldots,x_5]^T$ (设计变量)

使 $\min W=F(x_1,x_2,\ldots,x_5)$ (目标函数)

s.t. $\sigma_{max}-[\sigma]\leq 0$ (正应力约束条件)

$\tau_{max}-[\tau]\leq 0$ (剪应力约束条件)

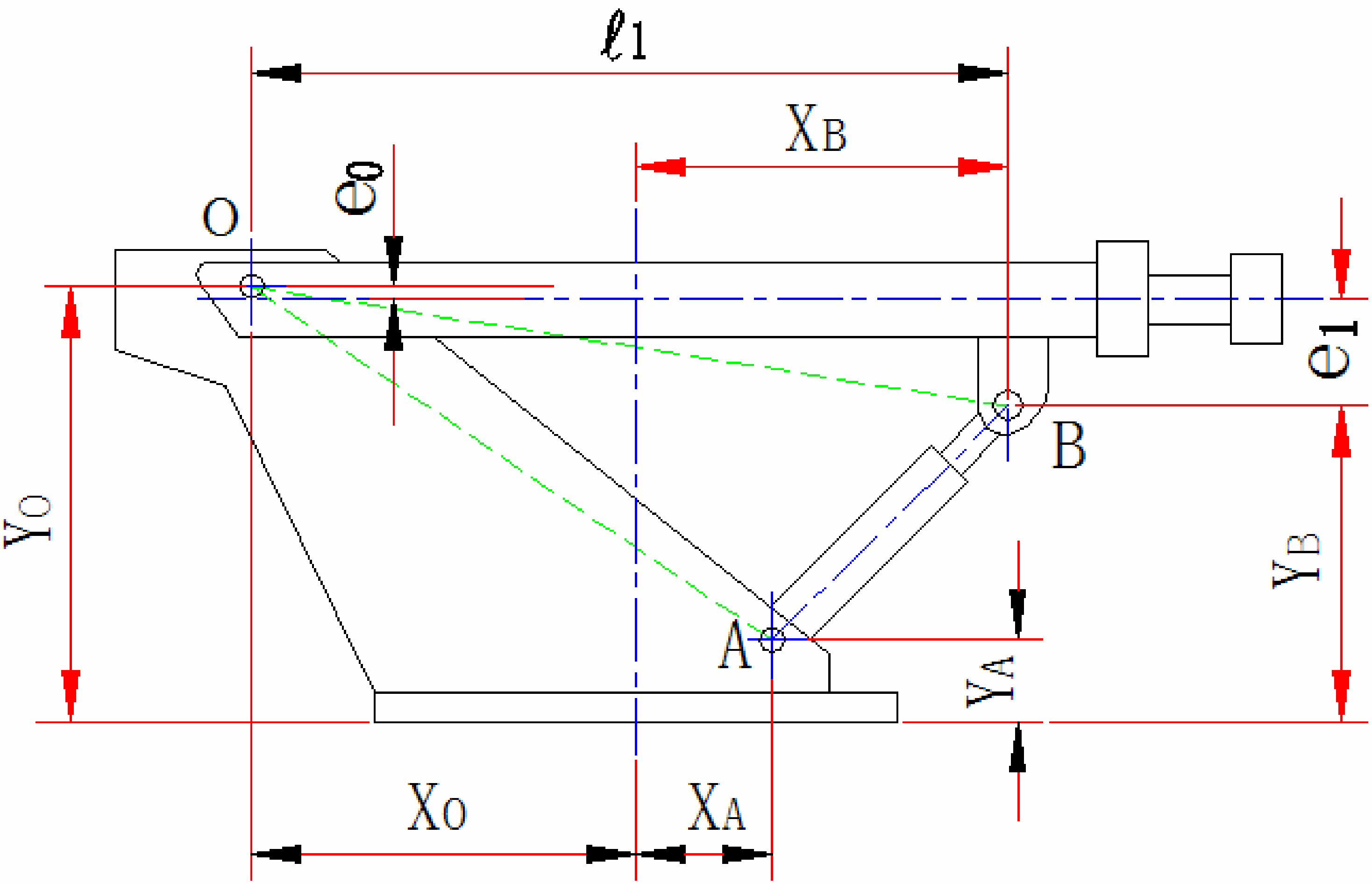
$f_L-[f]\leq 0$ (静刚度约束条件)

$f_D-[f]\leq 0$ (动刚度约束条件)

$\sigma_r-[\sigma_{cr}]\leq 0$ (局部稳定性约束条件)

$\sigma_{max}-[\sigma_r]\leq 0$ (疲劳强度约束条件)

4.3 伸缩臂变幅机构三铰点位置优化设计



优化设计变量简图

1、设计变量

$X=[x_A,y_A, x_B,y_B,x_C,y_C, \alpha_{max}]^T$

$=[x_1,x_2, x_3,x_4, x_5,x_6,x_7]^T$

2、目标函数

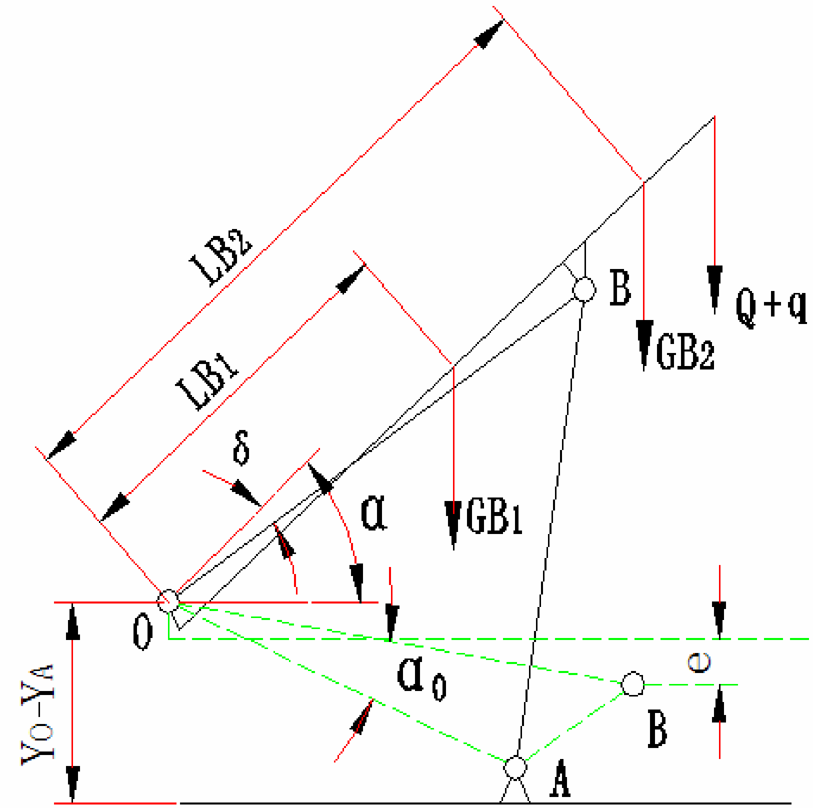
1. 变幅油缸受力最小 F1(X)

2. 变幅油缸压力波动值最小F2(X)

3. 转台受力最小 F3(X)

4. 吊臂受力最小 F4(X)

5. 吊臂工作长度最短 F5(X)



三、约束条件

1. 自变量上下限约束

$$x_{\min} \le x_1 \le x_{\max} \ (i = 1,2,\mathbf{L}\ ,7)$$

2. 结构的几何约束条件

$$OA + OB - AB > 0 \qquad OA + OB - AB' > 0 \qquad OA + AB - OB > 0$$

$$OA + AB' - OB > 0 \qquad OB + AB - OA > 0 \qquad OB + AB' - OA > 0$$

3.油缸伸缩比 λ

$$l_{\max} - l\, l_{\min} = 0$$

4. 油缸尺寸约束条件

$$\Delta L + (T_1 + T_2)_{\min} - L_{\min} > 0$$

5. 油缸受力约束条件