

复杂箱体的结构优化设计

秦东晨 徐业宜

(郑州工学院机械系) (合肥工业大学机二系)

摘要: 本文根据复杂箱体的特点,把有限元法做为结构分析和敏度分析的手段,选择了收敛速度快的序列二次规划法进行优化计算,最后把有限元分析与优化结合起来,进行复杂箱体的结构优化设计。本文用 FORTRAN 语言编制的箱体结构优化设计程序 OPTBOX,具有较强的功能和通用性。

关键词: 复杂箱体, 结构优化设计, 序列二次规划(SQP), 有限元法, 敏度分析
中图分类号: TP39

在机械行业中,复杂箱体构件应用相当广泛,这主要是由于具有良好的刚度、稳定性等特性。机座和箱体一类构件,就其重量而言,在机器中占有很大的比重,如在机床中约占总重量的 70~90%,同时在很大程度上影响着机器的工作精度及抗振性能。传统设计方法中,复杂箱体设计是把箱体简化为一个简支梁,但是截面特性的估计很粗糙,很难保证计算精度和可靠性,设计者不得不加大安全系数,这就导致了箱体构件笨重,体积大,浪费材料,而且很难保证其重要特性要求。因此,对箱体构件进行结构优化设计具有重要的理论意义和实用价值。复杂箱体结构件的结构优化问题中,减少迭代次数、缩短计算时间是一个关键问题,该问题目前国内外研究较少,只处于探索阶段。本文将从减少优化迭代次数出发,探讨和研究优化与有限元分析结合,同时对一具体工程实例进行结构优化设计,为此编制了结构优化设计程序 OPTBOX,具有一定的通用性和较强的功能。

1 结构分析及力学模型

箱体构件结构复杂,受力情况也比较复杂,内部肋板较多,因此传统设计方法无法进行精确的应力、位移分析,实验方法需要大量的人力与财力。随着计算机的飞速发展,有限元法成为一种有力的结构分析方法,本文采用有限元对箱体进行结构分析。箱体构件种类繁多,力学模型多种多样,下面以某厂生产的 500T 四立柱液压机的下横梁为例,进行结构分析和优化设计。

1.1 结构分析:

该液压机的下横梁如图 1 所示:

* 收稿日期: 1992-09-30

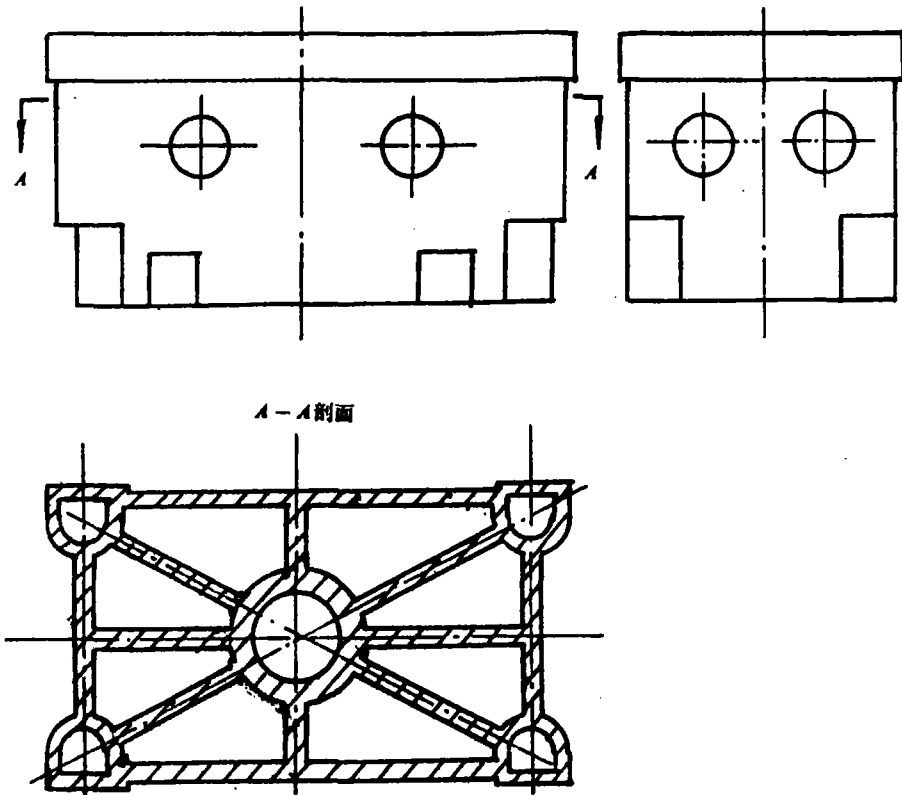


图 1

因为它具有结构对称性, 取其四分之一为研究对象, 然后进行有限元的网络划分, 采用空间膜单元和 8 节点块体单元, 节点共 490 个, 217 个空间膜单元, 127 个 8 节点块体单元。初次结构分析的结果与试验结果相吻合, 说明网格划分是合理的。

1.2 受力分析:

下横梁的受力情况如图 2 所示,

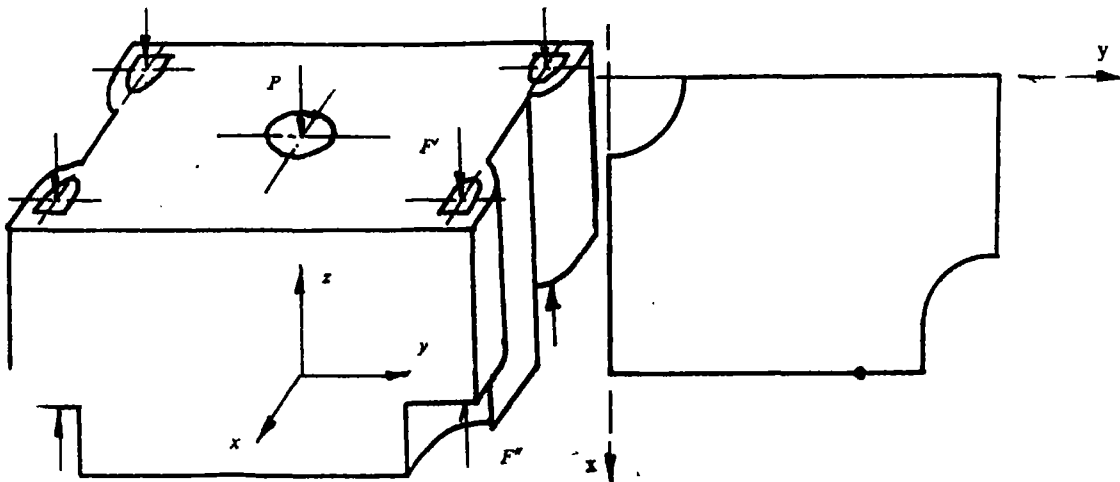


图 2

图 3

其中, 通过分析计算得到:

$$\begin{aligned} F' &= 1812500\text{N}, & \text{工作压力} \\ F'' &= 562500\text{N}, & p = 5000000\text{N} \end{aligned}$$

1.3 约束情况:

下横梁底板如图 3, 约束 A 点 X、Y、Z 方向位移, 约束交界面 I-I 上 Y 方向位移, 约束 II-II 交界面上 x 方向位移。

2 优化的数学模型

2.1 优化方法的选择:

由于箱体结构模型复杂, 进行一次约束函数计算和约束梯度计算需要大量 CPU 时间, 故主要矛盾是如何减少迭代次数, 因此选择了采取有效集、具有全局超线性收敛的序列二次规划法 (SQP), 这是首次用 SQP 法求解大型连续体问题。

2.2 结构的有限元分析:

有限元一般采用位移法求解, 其基本平衡方程为:

$$[K]\{\delta\} = \{R\}$$

其中 $[K]$ ——结构刚度矩阵

$\{\delta\}$ ——结点位移矢量

$\{R\}$ ——节点载荷矢量

求出位移 $\{\delta\}$ 后, 就可以得到各单元的应力, 完成一次结构的有限元分析。本文根据箱体结构的具体情况, 对 SAP5 结构分析程序进行调整, 分离出有关部分, 组成了箱体构件的有限元程序。

2.3 敏度分析:

SQP 法需要求目标函数、约束函数的导数, 这就要求位移和应力的导数, 因此采用敏度分析来求位移和应力的导数。经推导得到位移导数、应力导数分别为 $\frac{\partial \delta}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial \sigma}{\partial x_i}$

$$[K] \frac{\partial \{\delta\}}{\partial x_i} = - \frac{\partial [k]}{\partial x_i} \{\delta\},$$

$$\frac{\partial \{\sigma\}^j}{\partial x_i} = [D] \left(\frac{\partial [B]^j}{\partial x_i} \right) \{\delta\}^j + [D][B]^j \cdot \frac{\partial \{\delta\}}{\partial x_i}$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n$, n 指设计变量个数

$j = 1, 2, \dots, NE$, NE 指单元的个数

$$[K]^j = t \iint_e [B]^T [D][B]^j dx' dy'$$

具体计算过程十分复杂, 本文不再详述。

2.4 复杂箱体的结构优化数学模型:

$$\min f(X), X \in R^n$$

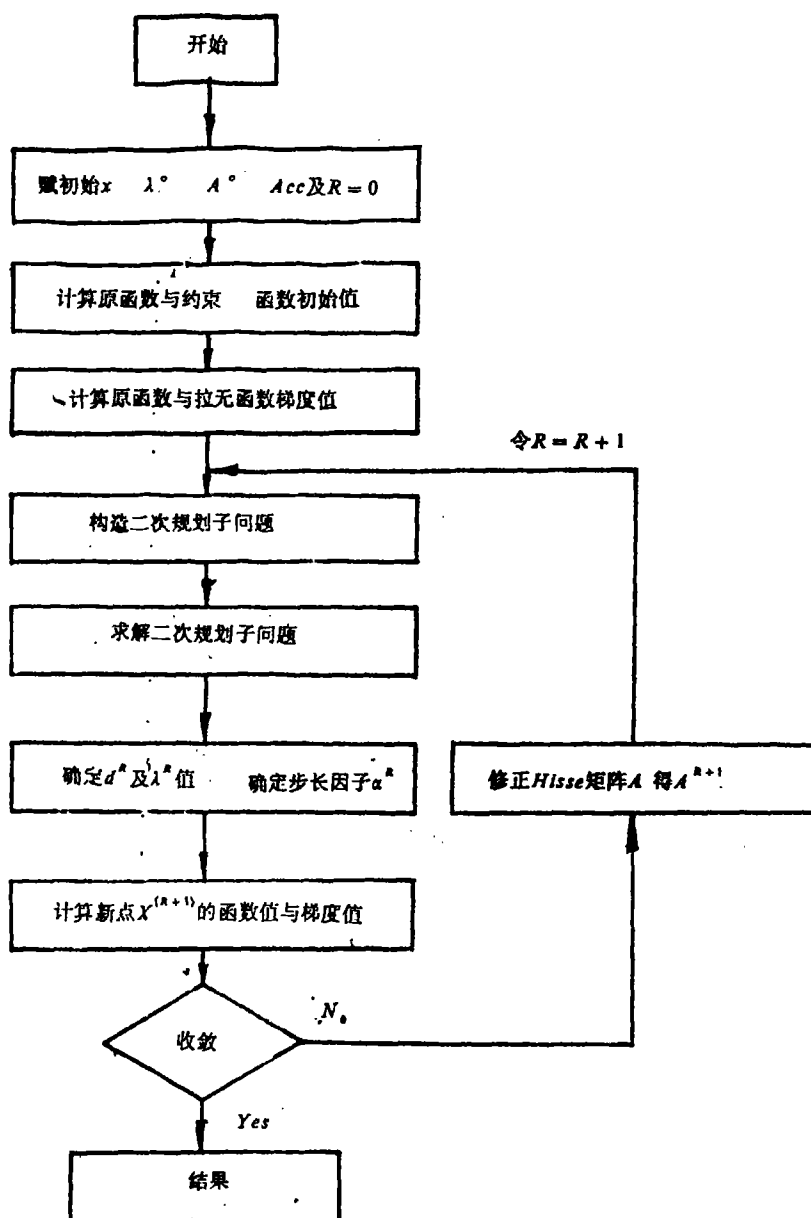


图4

$$s.t. \frac{\sigma_i}{[\sigma]} - 1 \leq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, NS)$$

$$\frac{\delta_j}{[\delta]} - 1 \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, ND)$$

$$X^{(L)} \leq X \leq X^{(U)}$$

其中 $f(X)$ 为箱体重量.

$[\sigma]$ 为许用应力值;

$[\delta]$ 为许用位移值,

$X^{(L)}$ 为设计变量下限值,

$X^{(U)}$ 为设计变量上限值,

NS 为应力控制点数,

ND 为位移控制点数.

选取两类设计变量, 一类是各板厚度, 包括筋板厚度、侧板厚度等; 另一类是影响单元积分域的变量, 包括梁深、工作台面厚度等. 箱体构件工作性能的主要指标是刚度, 其次是强度等. 本文只考虑箱体的静态问题, 静态刚度是一个重要的设计要求, 因此在复杂箱体结构优化设计中, 应严格控制位移要求, 适当控制应力约束, 并根据设计要求, 对设计变量的大小进行约束. 序列二次规划法的计算框图如图4所示.

3 计算实例

选择四立柱液压机下横梁的四分之一为研究对象.

3.1 结构优化数学模型:

(1) 设计变量的选取:

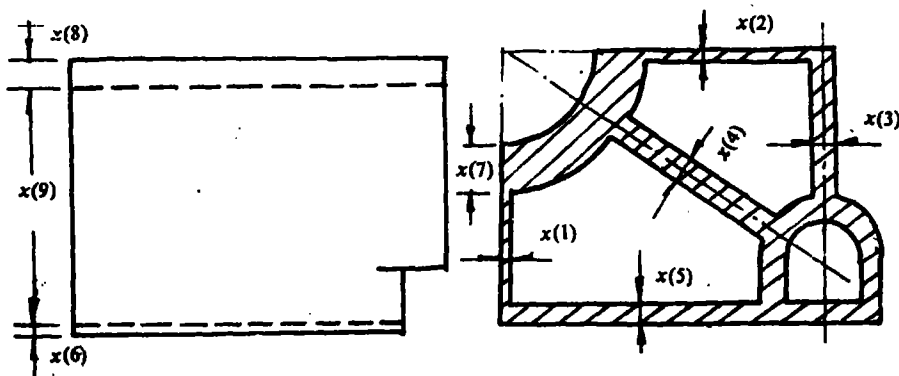


图5

设计变量选择如图5所示. 根据四立柱液压机参数的部颁标准, 下横梁工作台表面尺寸是标准尺寸, 所以不把它作为设计变量.

(2) 目标函数:

取下横梁的整体重量为目标函数, 下横梁占整个压力机重量的比例较大, 因此减少下横梁重量对减轻整机重量有较大意义. 下横梁重量为

$$f(X) = \rho \{ [660 \times 860 - \pi \cdot 180^2 \times (1/4)] [x(8) + x(6)] + x(9) [480x(1) + 800x(5) + 620x(2) + 660x(3) + 779.6x(5) + 180\pi x(7)/2] \} \text{ (kg)}$$

$$\text{其中 } \rho = 7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$$

(3) 约束条件:

$$\text{应力约束} \quad \frac{\sigma_i}{[\sigma]} - 1 \leq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, NS)$$

$$\text{位移约束} \quad \frac{\delta_j}{[\delta_j]} - 1 \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, ND)$$

其中 NS 为应力控制点, ND 为位移控制点

几何约束: $20 \leq x(i) \leq 60(\text{mm}) \quad (i = 1, 2, \dots, 6)$

$40 \leq x(i) \leq 80(\text{mm}) \quad (i = 7, 8)$

$$700 \leq x(9) \leq 900(\text{mm})$$

3.2 程序编制:

该程序由三大部分组成: 优化部分、分析部分、终止判断部分, 其中分析部分包括结构分析和敏度分析, 基本流程图如图 6 所示:

有限元分析可以进行网格的自动划分。程序用 FORTRAN 语言编制, 具有较强的通用性和一定的实用价值。

3.3 计算结果:

初始设计方案为

$X^0 = (25, 25, 50, 50, 50, 50, 65, 60, 751)^T$, 由结构分析得到该点不可行, 通过低精度优化计算, 得到可行点 $X' = (15, 34, 50, 72, 68, 60, 76, 60, 751)^T$ 。在最后优化计算中, 经过 6 次迭代, 在 VAX-11/780 机上花费 CPU 时间 1 小时 6 分左右, 得到优化后的设计变量为 $X^* = (33.42, 19.02, 30.0, 56.14, 36.91, 50.78, 55.97, 751.00)^T$

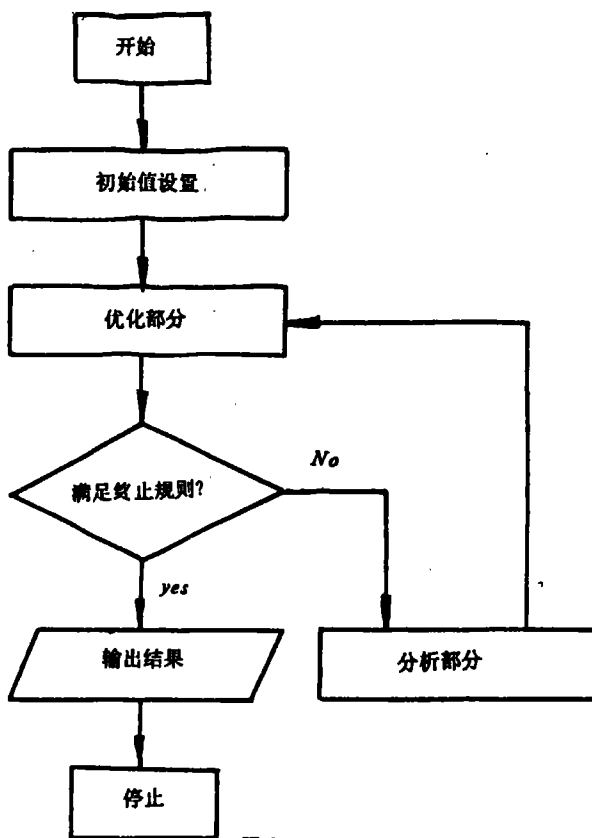


图 6

目标函数下降了 7.04%, 这是与原方案相比, 与可行点 X' 相比, 重量下降了 21.28%, 目标函数变化过程如下图 7 所示:

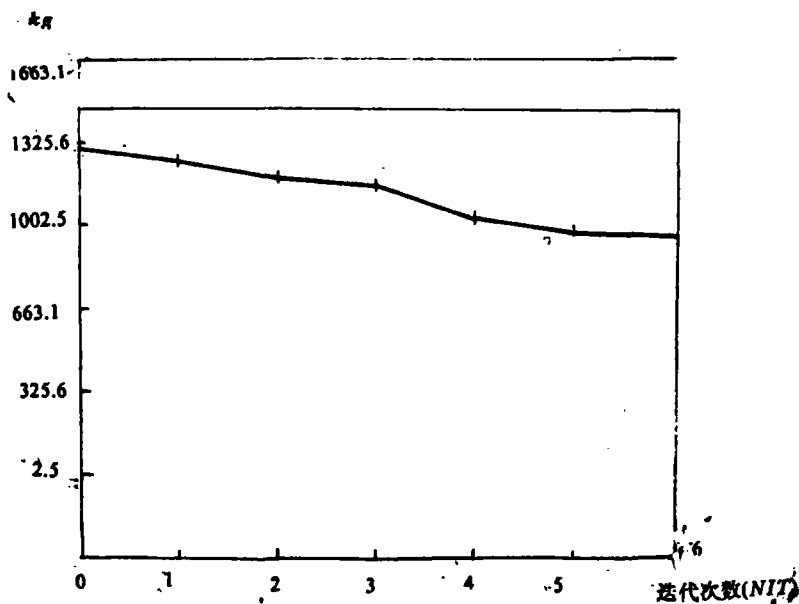


图 7

步长 α^k 的变化分别为 1.0, 1.0, 0.6, 1.0, 1.0, 0.2, 没有规律性, 这主要是因为所取的收敛精度较低。根据 Pschenichny 理论证明, 迭代次数不断增加时, 步长逐渐收敛于 1.0。

4 结 论

通过上述优化计算, 下横梁的重量比原设计方案减轻了 7.04%, 刚度满足了设计要求, 优化得到了合理的设计变量。序列二次规划法适用于大型结构优化问题求解, 是一种有效可靠的优化算法, 复杂箱体结构优化的结果有力地证明了这一点。

参 考 文 献

- (1) C. Maxwell. Scientific paper[] . 1869—Reprinted by Dover publications. New york, 1952
- (2) P.B.Thanedar, J.S.Arora, C.H.Tseng, O.K.Lim and G. J. Park. Performance of some SQP algorithms on structural design problems. Int. J. for Numer. Meths in Engrg., Vol.23, 1986, pp.2187-2203
- (3) G. N. Vanderplatts. Structural optimization—past, present and future. AIAAJ., Vol.20, No.7, 1982, pp.992-1000
- (4) A. D. Belegundu and J.S. Arora. A study of mathematical programming methods for structural optimization. partI: Theory; partII : numerical aspects, Int. J. Numer. Meths. Engrg. 21(9), 1985, pp.1583-1624
- (5) 钱令希, 钟万颢, 程耿东, 隋允康. 工程结构优化设计的一个途径——序列二次规划SQP.《计算结构力学及其应用》 Vol.1, No.1, 1984
- (6) 机械强度. 结构分析程序SAP5专輯, 1980年3月
- (7) 赵呈林主编. 锻压设备. 1987年, 西北工业大学出版社

The Structural Optimization Design of The Complex Structure Box

Chin Dongchen

Xu YieYi

(Zhengzhou Institute of Technology) (Hefei Polytechnic University)

Abstract: In this paper, the application of the structural optimization design of the complex structure box and some main problems which occur during the design are studied in detail. According to the structural characteristics of the complex structure box, the finite element (FE) method and the sequential quadratic programming (SQP) method with rapid convergence speed are used for structural analysis and sensitivity analysis as well as for optimal calculations respectively. Finally, the combination of the FEM with optimization is used in this dissertation to carry out the structural optimization design of the complex structure box.

Keywords: Complex box, structural optimization design, SQP(sequential quadratic programming). FEM(finite element method). sensitivity analysis