

复杂箱形梁初级优化设计的一种方法

秦东晨

袁 华

任泰安

(郑州工业大学机械系) (合肥工业大学, 230009) (河南机电专科学校, 新乡, 453002)

摘 要 为了在复杂箱形梁的结构优化设计计算中有效地减少结构重分析的次数, 本文提出了一种对复杂箱形梁进行分解分析的近似结构分析方法, 并给出载荷分配系数的概念, 在微型机上进行复杂箱形梁的结构优化设计, 得到了满意的结果, 为精确的结构优化设计提供了可靠、较优的初始点。

关键词 复杂箱形梁; 结构优化设计; 初级优化设计; 载荷分配系数

中图分类号 TH122

0 引言

复杂箱形梁是机械产品中常见的基础构件, 由于它的形状和受力往往非常复杂, 其传统的结构分析大量采用了近似计算和简化的方法, 计算结果很粗糙, 而现代设计方法——有限方法的采用为复杂箱形梁的结构分析提供了一种精确可靠的方法。有限元分析可以客观反映构件结构的应力和变形情况, 但复杂箱形梁的有限元分析需要大量的计算准备工作和计算机机时, 而且对计算机内存要求较高, 例如某压力机上的下横梁在 VAX-11/780 上进行分解结构的有限元分析, 一次分析需 CPU 时间为 15 分钟, 终端时间达 5~6 小时。因此, 复杂箱形梁的结构优化设计需要首先有效减少结构重分析次数, 希望能够采用一种有效的结构分析方法计算出复杂箱形梁控制点的位移和应力, 计算出的应力和位移值虽不及有限元分析的精确, 但比传统的计算方法精确的多。为此, 本文提出了一种对复杂箱形梁进行分解分析的近似计算方法, 从而在微型机上完成了这种大型结构优化设计问题的设计计算。

1 复杂箱形梁结构分析的分解分析法

图 1 所示为一液压机的下横梁, 以此为对象研究复杂箱形梁结构分析的分解分析方法。分解分析方法的原理是: 首先以该梁的受力特点及对其进行整体有限元分析的结果为依据, 把复杂箱形梁分解成若干个相对独立的简支梁, 通过对各简支梁进行一系列的有限元分析, 并参考有关弹性力学解析解的形式, 导出各梁控制点的位移、应力与梁深、梁厚及外载荷之间的关系, 然后借助于复杂箱形梁整体的有限元分析结果和分解后各简支梁的有限元结果, 推导出载荷分配系数, 合理地分配各简支梁上的外载荷, 从而考虑了各梁之间的联系。

收稿日期: 1996-11-25

第一作者: 男 1965 年 10 月生 工学硕士 副教授

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1.1 复杂箱形梁整体有限元分析

液压机工作时,下横梁的主要载荷有:垂直作用于工作台面且相对于工作台面中心对称分布的工作压力 P ,作用在耳环上表面螺栓的残余预紧力 F 和耳环下表面螺栓所受的总拉力 P' 。由于复杂箱形梁所受以上的几个力平行与 Z 轴,而且相对 Z 轴对称分布,所以其侧壁与筋板主要受其面积内的弯曲作用,下盖板主要受其面内的拉力作用。因此,在复杂箱形梁的有限元分析中,侧板、筋板和下盖板采用四边形膜单元,工作台面、中心圆套筒及耳环部分选用8节点和12节点的块体单元。

1.2 复杂箱形梁的分解

由于复杂箱形梁结构受力的对称性,只需要取其四分之一进行有限元分析,划分单元共365个,节点554个。经过计算数据与实测数据分析比较,说明这种单元的划分与选取对复杂箱形梁的有限元分析是合适与准确的,它为复杂箱形梁的分解提供了可靠的依据。

液压机的下横梁简化为图2所示的结构,忽略不计螺栓的残余预紧力。根据载荷和支承情况对整个横梁的内部力传递过程的分析,可以把结构复杂的横梁分解为两个简单组合梁和两个简单梁,如图3所示。其中,组合梁 L_1 由左右侧板和 Y 向筋板组成,组合梁 L_2 由左右侧板和 X 向筋板组成,简单梁 L_3 、 L_4 是两个斜向筋板(考虑到上下盖板,取其为工字梁),这就是复杂的一级分解。

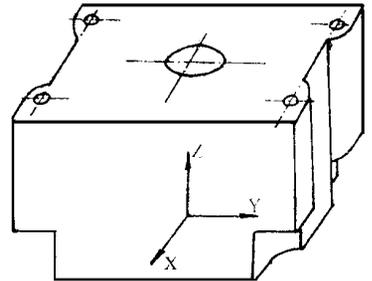


图1 液压机下横梁

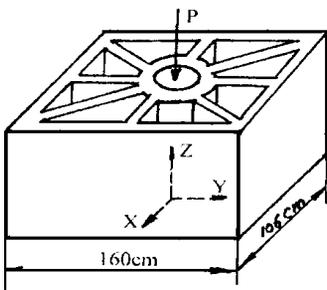
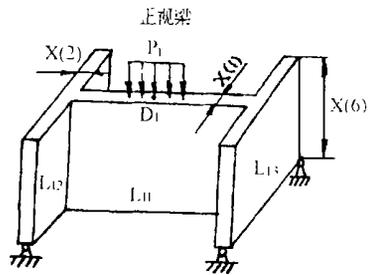
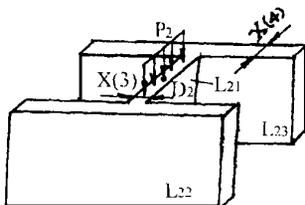


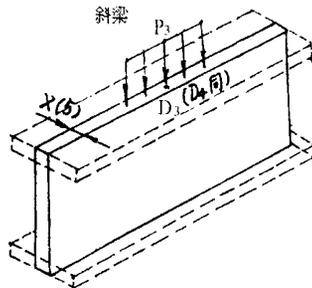
图2 液压机的下横梁简化图



(a) 组合梁 L_1



(b) 组合梁 L_2



(c) 简单梁 L_3 和 L_4

图3 横梁的一级分解

1.3 分解后各梁的应力与位移计算

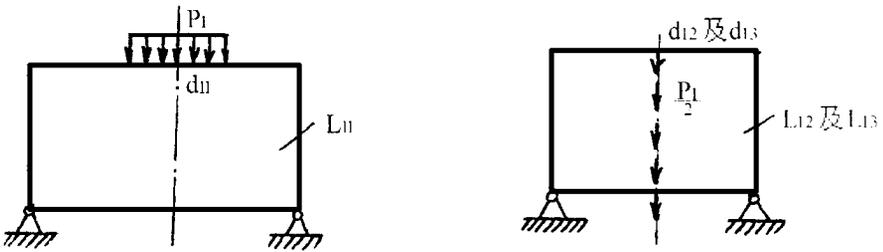
在结构优化设计中,往往对结构上关键点的位移与应力进行约束。根据横梁设计要求,取一级分解各梁的上边缘中心点 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为位移控制点,即要求这四个点的位移不得超过许用值。由于箱形梁采用铸铁材料,因此选取各梁的下边缘中心点为应力控制点。

为了便于计算各位移控制点和应力控制点的位移与应力,再把组合梁 L_1 和组合梁 L_2 作二次分解,分解为六个简单梁 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 和 L_{21} 、 L_{22} 、 L_{23} ,如图 4 所示。

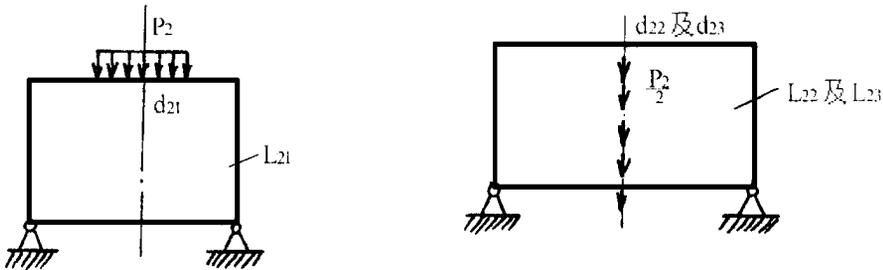
显然,组合梁 L_1 上 D_1 点的 Z 向位移应由图 4 支承条件下 d_{11} 点的 Z 向位移和点 d_{12} 的 Z 向位移迭加而成,即:

$$f_{D_1} = f_{d_{11}} + f_{d_{12}} \tag{1}$$

同理 $f_{D_2} = f_{d_{21}} + f_{d_{22}} \tag{2}$



(a) 梁 L_1 的二次分解



(b) 梁 L_2 的二次分解

图 4 组合梁的二次分解

虽然经过二次分解得到的各梁均为简单梁,但都为深梁,它超出了材料力学方法可解的范畴,加之荷载和支承条件的复杂,用弹性力学求出其解析解十分困难。为此,根据深梁变形的特点及有关弹性力学解,取如下形式的位移计算公式:

$$f = a_1 \frac{1}{bh^2} + a_2 \frac{1}{bh} + a_3 \frac{h}{b} \tag{3}$$

式中: f 为梁上边缘中心点的 Z 向位移, h 为梁高, b 为梁厚, a_1 、 a_2 、 a_3 为一组待定系数。应力计算公式取如下形式:

$$\sigma = \beta_1 \frac{1}{bh^2} + \beta_2 \frac{1}{bh} + \beta_3 \tag{4}$$

式中: σ 为梁下边缘中心点的最大主应力, h 为梁高, b 为梁厚, β_1 、 β_2 、 β_3 为一组待定系

根据梁高的变化范围,取 $h = 70\text{cm}, 84\text{cm}, 100\text{cm}$ 和 $b = 5\text{cm}$, 依次对各梁进行有限元分析, 确定出对应于各梁的十组系数。

1.4 载荷分配系数

把复杂梁分解为简单梁只是形式上的分解, 它们之间存在着内在的联系。因此, 必须引入载荷分配系数 C_i , 即分配在各梁上的载荷 $P_1、P_2、P_3、P_4$ 不是固定不变的, 而是随着各梁几何参数的变化而变的, 但其总和 P 不变, 则:

$$P_i = C_i(X) \cdot P, \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{5}$$

式中: $X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$ 表示各梁的几何参数, 也是以后横梁结构优化设计的设计变量(如图 3)。

通过定性分析和整体有限元数值分析表明, 各梁上所受的载荷与梁的综合刚度成正比, 考虑到优化过程中各梁的厚度都将受到一定范围的约束, 且各梁的高度是一致的, 因此取

$$\begin{cases} C_1 = a_1 \frac{x_1 x_2}{x_3 x_4 x_5 x_6} \\ C_2 = a_2 \frac{x_3 x_4}{x_1 x_2 x_5 x_6} \\ C_3 = C_4 = a_3 \frac{x_5}{x_1 x_2 x_3 x_4 x_6} \end{cases} \tag{6}$$

式中: $a_1、a_2、a_3$ 为待定系数, 由整体有限元分析结果和分解后各梁的有限元分析结果来确定, 其原则是两种方法求得的控制点位移值误差较小。

为了保证 $\sum P_i = P$, 要求 $\sum C_i = 1$, 因此必须对上述 $C_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 乘以系数 $\eta = \frac{1}{\sum C_i}$, 才能得出最终的载荷分配系数, 即

$$C_i \leq \eta \cdot C_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{7}$$

综合分析(3)、(4)、(5)、(6)、(7)式即可求得各二级分解梁上有关点的应移值和应力值。

2 复杂箱形梁的结构优化设计

2.1 数学模型

(1) 设计变量:

由于液压机下横梁四个耳环的中心距是按设计规范确定的, 因此只能取各侧板、筋板的厚度及梁高为设计变量, 如图 3 所示, 即设计变量为:

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

(2) 目标函数:

取横梁重量作为结构优化的目标函数, 即

$$F(X) = (160x_1 + 212x_2 + 106x_3 + 320x_4 + 384x_5) x_6 \rho$$

其中: ρ 为材料的密度。

(3) 约束条件:

在复杂箱形梁的结构优化设计中, 约束条件有两大类: 边界约束和性能约束。性能约束有控制点的位移约束和应力约束两种。

在所有位移控制点上,要求位移 $f \leq [f]$, 其中 $[f] = 0.6 \text{ mm}$ 为下横梁工作台面上的许用挠度。因此,位移约束函数可以表达为:

$$g_i(X) = \frac{f_{D_i}}{0.6} - 1, \quad i = 1, 2, 3$$

在所有应力控制点上,要求应力 $\sigma \leq [\sigma]$, 其中 $[\sigma] = 500 \text{ kg/cm}^2$ 为材料的许用应力值。因此,应力约束函数可写为:

$$g_i(X) = \frac{\sigma}{500} - 1, \quad i = 4, 5, 6, 7, 8$$

边界约束是指对各个设计变量的大小限制,取:

$$3 \leq x_i \leq 5, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5,$$

$$70 \leq x_6 \leq 100.$$

由上可见,复杂箱形梁结构优化设计数学模型的最大特点是目标函数和约束函数均为显函数,且连续可微,这就为结构优化设计提供了极大的方便。该优化问题采用复合形法进行求解。

2.2 优化结果

取原设计方案为优化计算的初始点:

$$X^{(0)} = [5, 5, 5, 5, 5, 84]^T, \quad F(X^{(0)}) = 3872.23 \text{ kg}.$$

经过 328 次迭代计算,最优点在位移约束的边界上得到,此时应力约束还比较富裕,这和下横梁的整体有限元分析结果是一致的,最优点处的目标函数值为:

$$F(X^*) = 2328.38 \text{ kg}.$$

横梁重量减轻了 1543.85 公斤,占原下横梁重量 5030 公斤的 30.1%。

3 结论

复杂箱形梁的有限元分析不仅要耗费大量机时,而且对计算机的内存要求较高,如果在结构优化设计计算中直接调用有限元程序进行结构分析,就需要大量的内存容量。本文采用对复杂箱形梁进行分解分析的方法,推导出近似程度较好的位移和应力计算公式,从而大大节省了结构分析的计算时间,在微机上实现了复杂箱形梁的结构优化设计。复杂箱形梁的有限元分析是在 VAX-11/780 上完成的,其结构优化设计是在微机上进行的,且仅用四分零九秒的计算时间。因此,这种方法具有很高的计算效率,可以应用于求解大型结构优化设计问题。

与结构分析的有限元法相比,复杂箱形梁的分解分析法是一种较为粗糙的结构分析方法。因此,把分解分析法应用于复杂箱形梁的结构优化设计中只是一种粗糙的优化设计,但它可以为精确的优化设计提供一个较好的初始点,也可为工程优化设计问题求解一个较为粗糙的优化方案,故称此方法为结构优化设计的初级优化设计。

参考文献

1 机构强度(Sap5 专辑), 1980.3

2 徐芝纶著. 弹性力学(第二版): 人民教育出版社, 1984. 3

A Preliminary Optimization Method to a Complex Box

Qin Dongchen

Yuan Hua

(Zhengzhou University of Technology)

(Hefei University of Technology, 230009)

Ren Taian

(Henan Mechanical and Electrical School, Xinxiang, 453002)

Abstract In this paper a dissolving and analyzing method for a complex-box beam to be reduced the re-analysis times in its structural optimization is given. The load distribution rate is declared. Using this method, the structural optimization design of the complex-box beam is finished and obtains a satisfied result. The result gives a feasible and better initial point for the following optimization.

Keywords complex-box beam; structural optimization design; preliminary optimization; load distribution rate

(上接 39 页)

参 考 文 献

- 1 谢维康, 施怀瑾. 专家系统及其在发电厂变电所中的应用. 北京: 水力电力出版社. 1994
- 2 Roger Jennings. Access for Windows. 北京: 学苑出版社. 1994
- 3 孙雅明, 王玉生, 姚恺等. 厂、站电气人员仿真培训专家系统. 电力系统及其自动化学报. 1995(3)
- 4 史忠植. 知识工程. 北京: 清华大学出版社. 1988

The Application of Relationship Database in the Substation Simulative Training Expert System

Jia Yanze Yang Wanhui Xie Qi Qi liangdi

(Zhengzhou University of Technology)

Abstract As the knowledge base and database are the essential and important parts of expert system, their functions can effect the operatability and universality of the system directly. They also have an influence on the user' appraisal. In the paper the methods of saving knowledge and data by using relationship database is analysed. Meanwhile, the author introduces the application of relationship database in the substation simulative training expert system with the example of simulative training in accidental state.

Keywords relationship database; simulative training; substation