

文章编号:1000-582X(2009)10-1117-05

液压机下横梁结构拓扑的进化结构优化

张大可¹, 孙圣权²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 中国核动力研究设计院, 成都 610005)

摘要:针对传统的形状尺寸优化方法难于获得全局最优解的问题,应用基于应力突变率的双向进化结构优化(BESO)算法对传统三梁四柱式液压机下横梁进行结构拓扑优化,分析进化历程和参数指标。算法实现了液压机下横梁最优结构拓扑和形状尺寸优化的一致,获得了合理的液压机下横梁新型拓扑结构。有限元分析对比表明,新结构实现了结构最大应力最小化和应力分布均匀化,提高了材料利用率。

关键词:拓扑优化;进化结构优化(ESO);液压机下横梁;有限元

中图分类号:TH122

文献标志码:A

Evolutionary topology optimization of the lower stable of a hydraulic press

ZHANG Da-ke¹, SUN Sheng-quan²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610005, Sichuan, P. R. China)

Abstract: It is difficult to obtain the globe optimum solution by applying conventional sizing and geometrical optimization methods. Evolutionary topology optimization is conducted for the lower stable of a hydraulic press using a bi-directional evolutionary structure optimization (BESO) method based on ratio of stress changes, and the evolutionary history and index are analyzed. The presented algorithm obtains the simultaneous optimization on both geometry and topology, and a new topology of the lower stable of the press is evolved which possesses a reasonable topological structure. The results of finite element analysis show that the new structure has decreased maximum stress, uniform stress distribution and good material usage.

Key words: topology optimization; evolutionary structure optimization; hydraulic press lower stable; finite element method

液压机是一种通用锻压设备,下横梁(也称工作台)是液压机的重要基础件。常见的中小型液压机下横梁是一箱型结构,传统设计方法是将其简化为简支梁进行计算^[1],这种处理很难保证计算的精度和可靠性。设计者不得不加大安全系数,导致结

构重量增大,材料浪费。

有限元法为机械结构分析提供了强有力的分析手段,国内采用不同的思路和方法就液压机结构作了相关的研究工作^[2-4],但现有的研究工作多局限于对结构作有限元分析校核,或在参数化的基础上对

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(50875268)

作者简介:张大可(1956-),重庆大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为现代设计方法和机械结构设计,
(E-mail)dkzhang@cqu.edu.cn。

原结构做板厚尺寸优化,这些成果未能在根本上对原结构的改进。

进化结构优化 (Evolutionary Structural Optimization, ESO, 又译为渐进结构优化)^[5] 由 Xie Y. M 和 Steven G. P 在 1993 年提出,它把适者生存的生物进化论思想引入结构拓扑优化,通过将无效的或低效的材料一步步去掉,从而使结构逐渐趋于优化。该方法思想简单、通用性好,许多数值算例已经证明该方法的可靠性和有效性。双向进化结构优化法 (Bi-Directional Evolutionary Structural Optimization, BESO)^[6-7] 在 1998 年由 Yang 和 Xie 提出。其核心思想是在删除单元的同时在需要的区域添加单元,添加单元的操作使得其在优化进程中可以找到更优的传力路径,从而避免最优拓扑的丢失。近年来,ESO 方法的研究在机械、土木、航空、材料等领域取得了不少理论成果并开始向实际应用发展^[8-13]。

笔者运用基于应力突变率的双向进化结构优化算法^[14]对液压机下横梁进行结构拓扑优化,实现液压机下横梁最优结构拓扑和形状尺寸优化的一致,获得结构的全局最优解。本文成果对下横梁原结构有较大改进,方法为液压机结构的设计提供了新的思路和方法。

1 液压机下横梁的结构拓扑优化模型和基于应力变化率的 BESO 算法

1.1 液压机下横梁的优化模型

结构最优化的重要指标是结构重量的最轻量化。这一指标常转化为所谓满应力设计,即结构的所有材料都理想地达到其规定的许用应力。将液压机下横梁结构进行有限元离散化后,原连续体的重量最轻量化问题可以用模型的体积最小化表示为

$$\left. \begin{aligned} \min V &= \sum_{i=1}^n V_i \alpha_i; \\ \text{s. t. } \sigma_j &\leq [\sigma], j = 1, 2, \dots, m \quad (m \leq n); \\ \alpha_i &\in (0, 1), i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 V_i 为第 i 个单元的体积, α_i 是指示开关,按该单元在模型中是保留还是删除分别取值为 1 或 0, σ_j 是第 j 个单元的应力, m 是计算模型中保留单元的数目, n 是模型单元总数。

1.2 基于应力突变率的双向进化结构进化原理

应力突变率可以定义为:结构所有各单元在单元删除前后两种拓扑结构中的应力的比值。据此实施双向结构进化优化的准则是,在进化结构与拓扑优化过程中,根据判断准则删除了对结构贡献度不大的单元后,对形成的新拓扑结构和单元删除之前

的拓扑结构进行比较,计算各单元的应力突变率。如果应力突变率大于规定的临界值,则说明该单元的删除对结构拓扑发生了很大的影响。这个影响更多的是因为其周围单元的删除使得附近结构发生突然改变,导致应力突变,因此可以将这种单元划归于误删单元。有必要把这些误删的单元重新添加到结构中使得结构应力的改变趋于平缓。

1.3 基于应力突变率的双向进化结构优化的实施

基于应力突变率的双向进化结构优化方法原理,应删除单元的应力阈值为

$$\sigma_e^{im} \leq RR_i \times \sigma_{\max}^{im}, \quad (2)$$

$$RR_i = RR_i + ER. \quad (3)$$

式中: σ_e^{im} 为各单元的第四强度应力; σ_{\max}^{im} 为单元最大第四强度应力; RR_i 为第 i 步单元删除率; ER 为单元进化率。

以应力突变率作为结构拓扑优化进程中添加单元的判断依据,则有如下准则

$$\sigma_{i+1,e}^{im} / \sigma_{i,e}^{im} \geq k. \quad (4)$$

式中, $\sigma_{i+1,e}^{im}$ 为当前删除率下删除单元后,各单元应力; $\sigma_{i,e}^{im}$ 为当前删除率下删除单元之前该单元应力; k 为单元应力突变率,取值在 0.5~0.6 之间。

算法实施步骤为:

- 1) 定义结构能占有的最大允许物理区域,并作为结构初始设计区域;给定初始删除率和进化率;
- 2) 用有限元精细网格离散结构;
- 3) 指定连接支承、载荷和单元特性值;
- 4) 完成结构线性静力有限元分析,提取各单元应力;
- 5) 按照式(2)删除一定数量的单元;
- 6) 在删除操作以后,再次完成当前结构线性静力有限元分析,提取各单元应力;
- 7) 按照式(4)确定发生应力突变的单元,计为集合 Q ,然后确定与该集合单元邻接的材料数编号为零的所有单元,计为集合 P ;增添集合 P 中所有的单元,如果式(4)不满足则说明单元删除合理。
- 8) 如果在当前结构中既不存在满足式(2)的单元,也不存在满足式(4)的单元,则结构拓扑达到一个稳态,稳态数 SS 增一,并按照式(3)增加删除率。
- 9) 用这个增加的删除率重复步骤 4)~步骤 8)直至达到性能指标最大或达到指定的应力限或准则限。

1.4 流程图

采用 ANSYS 软件,运用软件自身附带的 APDL 语言编程实现算法。算法流程图如下:

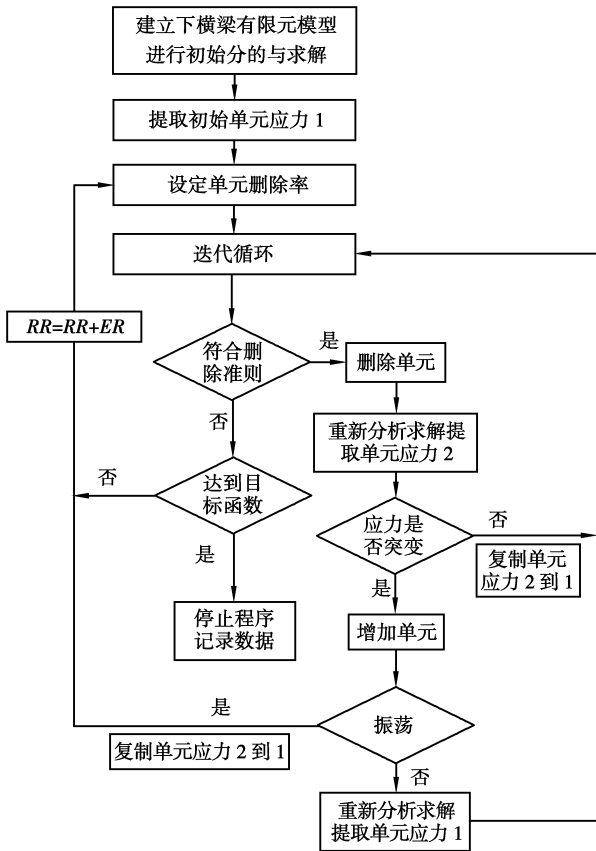


图 1 算法流程

2 液压机下横梁结构拓扑优化的实现

2.1 液压机下横梁结构基础拓扑

将进化结构优化方法应用于拓扑优化的第一步是要确定基础拓扑结构。基础拓扑结构是指原始设计区域,即结构所能占有的最大物理区域。液压机下横梁为外廓长、宽、高尺寸相当的箱形结构,因此其基础拓扑结构可取为六面体。按某型液压机基本尺寸参数要求,下横梁基础拓扑结构六面体尺寸取为:长×宽×高 = 1 200×800×500。下横梁上表面为工作台面,为此须设置基础拓扑上表面 50 mm 厚度区域为下横梁工作台面拓扑进化保留区或称为拓扑非设计区。结构材料为 HT 200,杨氏模量 $E=126 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$ 。选用 8 节点四面体单元,结构单元如图 2 所示。

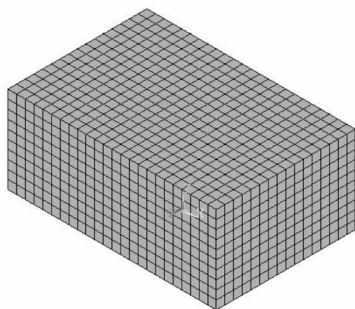
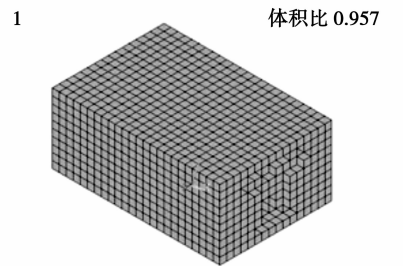


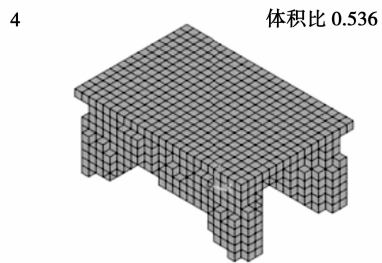
图 2 液压机下横梁基础拓扑

2.2 下横梁拓扑的进化结构优化

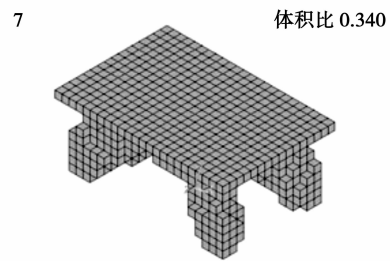
设定初始单元删除率 $RR_0=0.005$,单元进化率 $ER=0.005$,稳态数为 0。当稳态数为 1、4、7 和 10 的部分进化进程和最优化拓扑如图 3 所示(限于篇幅,未示出全部进程),稳态数为 10 时,获得最终拓扑。与传统液压机下横梁箱形结构不同,这里没有四侧的竖板,主要承载结构是中间部位为方形支撑,并且以此方形支撑连接对角结构而构成,可以将其视为两筒支梁相交的结构。



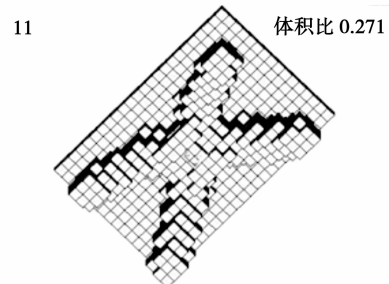
(a) 稳态数为 1, $RR=0.005$



(b) 稳态数为 4, $RR=0.02$



(c) 稳态数为 7, $RR=0.035$



(d) 稳态数为 10, $RR=0.05$, 底面视角

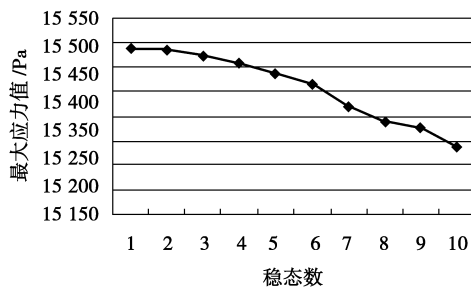
图 3 下横梁拓扑结构进化历程

2.3 进化历程及参数指标分析

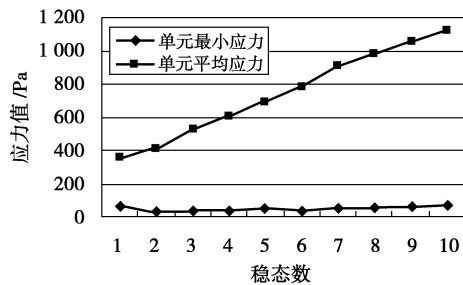
进化进程数据指标如表 1 和图 4。

表1 进化结构优化进程各关键指标

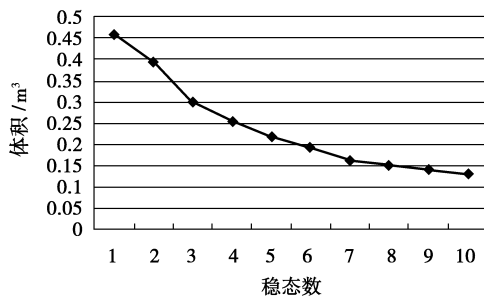
RR	最大应力 /Pa	最小应力 /Pa	体积 /m ³	平均应力 /Pa	性能指标 PI
0.005	15 487.866 5	26.146 3	0.459 5	342.989 0	1.044 6
0.01	15 487.434 3	58.433 3	0.395 0	356.502 7	1.215 4
0.015	15 485.028 7	23.308	0.298 5	405.316 4	1.609 5
0.02	15 473.505 8	31.787 8	0.257 5	524.178 2	1.867 7
0.025	15 458.052 5	38.398 1	0.218 5	600.638 8	2.203 8
0.03	15 438.529 4	51.153 5	0.192 0	694.588 5	2.511 7
0.035	15 415.957 4	38.334 4	0.163 0	779.715 5	2.967 7
0.04	15 368.520 7	56.767 8	0.151 0	908.463 0	3.209 9
0.045	15 338.029 1	56.364 6	0.140 5	978.362 1	3.452 3
0.05	15 326.821 4	63.017 9	0.130 0	1 044.506 0	3.740 7



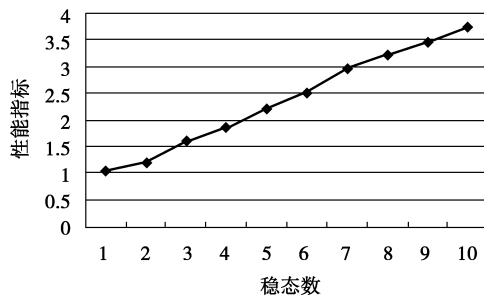
(a) 优化过程中单元最大应力变化曲线



(b) 优化过程中单元平均应力和最小应力变化曲线



(c) 优化过程中结构体积变化曲线



(d) 性能指标变化曲线

图4 进化优化历程参数指标

2.3.1 单元最大应力值的变化

图4(a)表明拓扑进化过程中,结构最大应力值一直在减小,因最大应力分布相对整体结构来说只是很小的局部区间,而设计中又不得不以此最大值为设计依据,因此最大应力的减小对结构设计是有利的。

2.3.2 单元平均应力和最小应力的变化

图4(b)表明单元的平均应力在拓扑进化进程中一直是上升的,这体现出结构材料的利用越来越充分。最小应力值一直变化不大,是因为结构中总是存在进化边缘区域,尽管该处单元应力较小,但不能删除。

2.3.3 体积变化

图4(c)是进化进程的结构体积变化,结构总体积是一直减小的,曲线开始段主要是由删除率控制,体积下降较快;随着双向进化的单元增加操作,体积下降趋于平缓。

2.3.4 进化进程性能指标

在拓扑优化中,最关心的问题之一是在优化过程中确定设计的效率。换言之,有必要用一个“指示器”比较优化设计的性能。经常采用的性能指标构成参数为目标函数(重量,体积)和约束(应力)^[15-16],采用以下性能指标(PI)公式,第*i*次迭代的性能指标为

$$PI_i = \frac{(\sigma_{\max}^{sm})_0 \times V_0}{(\sigma_{\max}^{sm})_i \times V_i} \quad (5)$$

式中 V_0 和 $(\sigma_{\max}^{sm})_0$ 分别是原始设计域的体积和最大第四强度应力, V_i 和 $(\sigma_{\max}^{sm})_i$ 分别是当前设计域的体积和最大第四强度应力。在优化过程中,用性能指标公式测量拓扑设计的效率。图4(d)反映迭代过程中性能指标 PI_i 随优化进程而数值增加,指示结构拓扑的不断改进。

3 新旧拓扑结构下横梁的计算比较

3.1 优化拓扑结构与传统拓扑结构的比较

按传统的简支梁设计理论,液压机下横梁的侧板是梁截面的抗弯截面模量不可分割的组成部分。但有限元分析表明,四块竖直侧板上的应力值很低,材料远未得到充分应用。因此采用传统的下横梁拓扑结构(图5(a)),是无法获得重量最轻最优解的。

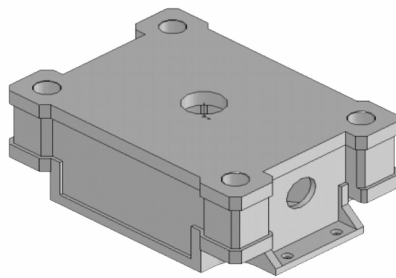
将结构进化优化获得的拓扑,参考某型液压机下横梁的相关外廓尺寸进行光滑化修整,得到了新型液压机下横梁拓扑结构(图5(b))。与传统中小型液压机相比,下横梁无四侧板,采用对角结构支撑作为下横梁主承载板件。

3.2 计算数据对比

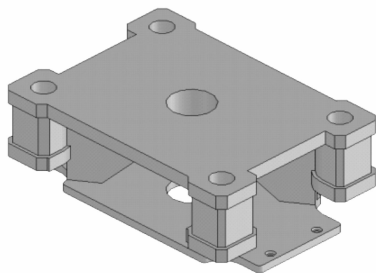
对液压机下横梁原结构和新型结构分别进行有限元分析和板厚尺寸优化,其应力值等指标的计算对比如表2。

表2 新旧拓扑结构液压机下横梁有限元分析比较数据

指标	最大应力 /MPa	最大应变	最大位移 /m	体积 /mm ³
原下横梁结构	126	9.97×10^{-4}	2.37×10^{-4}	1.79×10^8
新结构	82.3	6.54×10^{-4}	2.36×10^{-4}	1.38×10^8
改变量/%	-34.7	-34.4	-0.4	-22.6



(a) 下横梁原结构



(b) 下横梁新结构

图 5 液压机下横梁结构

由表 2 可知,经过进化结构优化后的新型拓扑结构的液压机下横梁最大应力值、应变值都有不同程度的降低,新拓扑结构下横梁受力均匀,材料利用合理。新拓扑结构液压机下横梁体积减少了 22.6%,达到了减轻重量目的。

4 结 语

应用基于应力突变率的双向进化结构优化(ESO)算法对液压机下横梁进行结构拓扑优化,下横梁新型结构去除了四侧竖板,以交叉简支梁作为主要承载构件。与传统计算方法以箱体侧板为主要承载板件的液压机下横梁结构相比,改善了结构的力学性能,减轻了重量,提高了材料利用率。

参考文献:

- [1] 俞新陆. 液压机[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [2] 侯晓望,童水光. 基于有限元分析的液压机结构优化[J]. 重型机械,2005(4):46-48.
HOU XIAO-WANG, TONG SHUI-GUANG. Structure optimization of hydraulic press based on FE Analysis[J]. Heavy Machinery,2005(4):46-48.
- [3] 秦东晨,祁建中,张明成,等. 液压机横梁结构的优化设计[J]. 锻压技术,2004(2):49-52.
QIN DONG-CHEN, QI JIAN-ZHONG, ZHANG MING-CHENG, et al. Structural optimization design for hydraulic press beams[J]. Forging & Stamping Technology, 2004(2):49-52.
- [4] 杨秀萍,宗升发,曹晓邨. 液压机结构设计的有限元法[J]. 重型机械,2003(6):38-41.
YANG XIU-PING, ZONG SHENG-FA, CAO XIAO-CUN. Structural design of hydraulic with finite element

- method [J]. Heavy Machinery, 2003(6):38-41.
- [5] XIE Y M, STEVEN O P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. Computers and Structures, 1993,49 (5) :885-896.
- [6] YANG X Y, XIE Y M. Bi-directional evolutionary method for frequency optimization [C]//Proceeding of the Australasian conference on structural optimization, Feb. 11-13, 1998, Sydney, Australia. Sydney: [s. n.], 1998: 231-237.
- [7] HUANG X, XIE Y M. Convergent and mesh-independent solutions for the bi-directional evolutionary structural optimization method [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 43 (14): 1039-1049.
- [8] ANSOLA R, VEGUERIA E, CANALES J, et al. A simple evolutionary topology optimization procedure for compliant mechanism design [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 44 (1/2): 53-62.
- [9] LIU Y, JIN F, LI Q. A strength-based multiple cutout optimization in composite plates using fixed grid finite element method [J]. Composite and Structures, 2006, 73 (4): 403-412.
- [10] LI W, LI Q, STEVEN G P, et al. An evolutionary shape optimization for elastic contact problems subject to multiple load cases [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2005, 194 (30/33): 3394-3415.
- [11] YANG X Y, XIE Y M, STEVEN G P. Evolutionary methods for topology optimization of continuous structures with design dependent loads[J]. Computers and Structures, 2005, 83 (12/13) : 956-963.
- [12] CERVERA E, TREVELYAN J. Evolutionary structural optimisation based on boundary representation of NURBS. Part I: 2D algorithms[J]. Computers and Structures, 2005, 83 (23/24): 1902-1916.
- [13] DAS R, JONES R, CHANDRA S. Damage tolerance based shape design of a stringer cutout using evolutionary structural optimization [J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14 (2) : 118-137.
- [14] 孙圣权,张大可,徐云岳等. 基于应力突变率的双向进化结构优化方法[J]. 机械设计与研究,2008,24(2):6-9,18.
SUN SHENG-QUAN, ZHANG DA-KE, XU YUN-YUE, et al. A bi-directional evolutionary structural optimization method based on ratio of stress change [J]. Machine Design & Research, 2008,24(2):6-9,18.
- [15] QUERINL O M, STEVEN G P, XIE Y M. Evolutionary structural optimisation using an additive Algorithm[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 34 (3/4) : 291-308.
- [16] QUERINL O M, YOUNG V, STEVEN G P. Computational efficiency and validation of bi-directional evolutionary structural optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 189 (2) : 559-573.

(编辑 张小强)