

基于 Isight 的液压机下横梁筋板布置位置优化设计

林谢昭,沈梦安

(福州大学 机械工程及自动化学院,福建 福州 350108)

摘要: 液压机下横梁是关系到整机几何刚度和制品成型精度的重要零件。为了获得材料最优布置的箱梁结构形式,对横向筋板厚度不同情况下的筋板布置位置进行优化,利用有限元分析与灵敏度分析获得参数化模型,结合最优拉丁超立方设计建立基于径向基神经网络的近似优化模型,用序列二次规划法(NLPQL)求解。结果表明,横向筋板厚度对梁的刚度性能影响最大,当厚度从小到大变化时,筋板的最优位置布置由中间相对集中方式逐渐往均匀分布方式变化。不同厚度的横向筋板对应有着不同的最优布置方式。在保持原刚度不下降的前提下,可将质量减小约 12%。

关键词: 布置优化;参数化建模;下横梁;液压机

中图分类号: TP273⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2019)04-0106-04

Optimization Design of Connecting Location of Stiffener for Hydraulic Press' s Beam Based on Isight

LIN Xiezhao, SHEN Meng'an

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The base cross beam of the hydraulic press has a dominant effect on the stiffness of the frame rigidity and the forming precision of products. To obtain the optimal layout of the beam structure, the connecting location of stiffener is optimized under the different thickness of transverse stiffener. Its parametric model is built by using the finite element method and sensitivity analysis. The approximate model based on RBF is established by using the Opt LHD method, then, this model for optimization is solved by NLPQL algorithm. The results show that the thickness of the transverse stiffener has great influence on the stiffness of the beam. With its thickness change, the optimal location changes from the relative concentration in the middle to a uniform distribution. In the new design schemes, the mass of beam can be dropped down to 12%, its original stiffness is not changed.

Keywords: optimal connecting location; parametric model; base beam; hydraulic press

0 引言

液压机下横梁一般采用焊接或铸造制成箱形结构,其结构设计的合理性对整机质量、几何刚度性能以及制品的成型精度和生产效率等都有直接的影响^[1]。近年来,将有限元和优化设计等现代设计方法应用于下横梁结构优化,以板厚、梁高等为设计变量,在满足强度、刚度等条件下减轻质量,降低制造成本,取得了良好结果。冯瑞年等^[2]对 YA32-500 四立柱液压机梁高板厚等进行优化,以下横梁质量为目标函数,优化后结构强度、刚度完全满足设计要求,同时质量下降了 7.04%。丁曾飞等^[3]基于软件协同分析与优化,以下横梁结构静态应力分布和等效变形为基础,轻量化为目标,对各板厚尺寸进行优化,得到刚度变化小而质量下降 3.36t 的结果。文献[4-9]也从其他方面对横梁尺寸进行优化,有效地改善了下横梁综合性能。现在大都只对于结构板的厚度尺寸进行优化,而筋板布置位置以及不同结构位置筋板的刚度对箱梁的性能起着重

要作用。由于筋板布置位置与筋板的厚度、间距及定位尺寸等密切相关,不同的筋板厚度对应的优化可行域也不同,这为筋板位置优化带来困难。在不牺牲刚度性能前提下,将筋板布置的结构位置和板厚、梁高等尺寸一起优化,得到箱梁的最优筋板布置方案,这是提高液压机下横梁综合性能的重要方面。

本文在对某型液压机下横梁原设计结构进行有限元分析和灵敏度分析的基础上,采用参数化建模技术,结合最优拉丁超立方设计采样法和人工神经网络近似模型建立下横梁的轻量化优化模型,使用序列二次规划法(NLPQL)对下横梁优化模型求解,获得满足设计要求的最优筋板位置,从而提高下横梁综合性能。

1 有限元模型和灵敏度分析

1.1 有限元模型

以某 1000t 型无立柱液压机下横梁为对象,它是由泊

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2017J01692)

作者简介: 林谢昭(1971—),男,福建福州人,副教授,博士,研究方向为 CAD/CAE、自由度缩减及其在优化设计中的应用等。

松比为 0.28,弹性模量为 2.1×10^5 MPa 普通碳素钢组成的焊件,考虑到其受力情况和几何结构是关于横、纵向对称分布,建立其 1/4 模型,并在结构对称面上分别施加 x 、 y 对称约束。在底板地脚螺栓处施加纵向位移约束。在工作台上板面及与立柱联接凸台的下表面区域分别施加总值为 2.5×10^6 N 的面载荷。选择 C3D8I 单元划分网格。下横梁网格模型^[10-13],载荷与约束如图 1 所示。

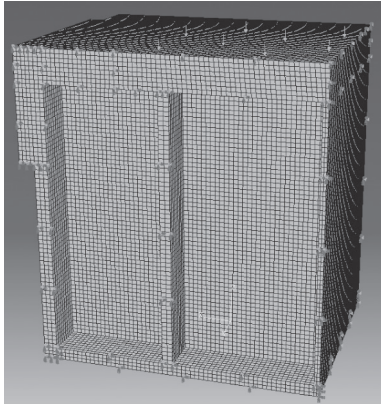


图 1 下横梁的网格模型、载荷与约束

1.2 下横梁模型灵敏度分析

下横梁结构设计参数众多,需要对下横梁进行灵敏度分析,从中选出对性能和质量影响明显的关键参数,以便进行参数建模和获得合适的优化设计近似模型^[14]。在最初建立的模型中很难确定哪个参数对目标函数影响程度的大小,开始先尽可能多地选择参数。考虑到箱梁结构及其受力变形状况,具体选择如图 2 所示。

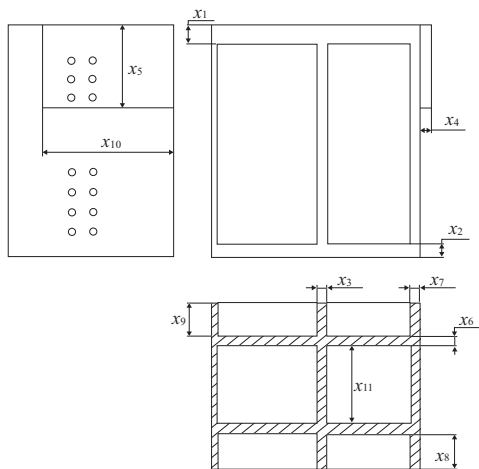


图 2 下横梁 1/4 结构示意图

其中,由于下梁主要是表现出横向弯曲的变形状态,纵向筋板的布置位置对梁的刚度性能贡献较少,所以本次优化未将这一因素考虑在内。采用单因素分析方法,由于板间距和凸台宽等位置尺寸和板厚尺寸不在一个数量级,所以将结构的目标函数(性能)对该结构设计参数的灵敏度定义为由设计参数增量所引起的目标性能的变形增量与该结构设计参数的相对增量之比^[15-16],即

$$\left. \begin{aligned} \Delta \xi_i &= \frac{\Delta x_i}{x_i} \\ S_i &= \left| \frac{\Delta f_i}{\Delta \xi_i} \right| \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\Delta \xi_i$ 为设计参数的相对增量; Δf_i 为性能相对增量。

通过比较 S_i 可以看出各设计变量的变动对目标性能的不同程度影响,从而剔除那些对下梁质量和刚度灵敏度值较小的设计变量。灵敏度分析结果如表 1 所示。

表 1 下梁刚度及质量灵敏度计算结果

设计参数	原设计 尺寸/mm	参数变动 后尺寸/mm	刚度灵 敏度/(%)	质量灵 敏度/(%)
x_1 上板厚	120	132	8.53	23.52
x_2 底板厚	80	88	3.02	15.64
x_3 纵向筋板厚	60	66	4.03	15.25
x_4 凸台厚	70	77	1.42	4.12
x_5 凸台高	500	550	3.32	4.21
x_6 横向筋板厚	60	66	21.80	23.77
x_7 侧板厚	60	66	3.80	8.33
x_8 下横板布置位置	220	242	9.95	0.00
x_9 上横板布置位置	200	220	9.70	0.00
x_{10} 凸台宽	800	880	16.40	5.15
x_{11} 横向筋板间距	460	506	16.80	0.00

从灵敏度分析结果可知,横向筋板厚度 x_6 对下横梁刚度性能影响最大,其次是横向筋板的间距 x_{11} 和凸台宽度 x_{10} 。而影响再次的 x_8 、 x_9 ,还是与横向筋板的布置位置有关。对下横梁质量影响最大的参数是横向筋板厚度 x_6 和工作台面厚度 x_1 ,其次是底板厚度 x_2 和纵向筋板厚度 x_3 。横向筋板厚度 x_6 是影响梁刚度和质量的最重要参数,上、下板和横向筋板厚度对梁质量有重要影响而对梁刚度的影响相对较小。与横向筋板布置有关的各个参数对梁的刚度有着重要影响而对梁的质量没有影响。因此,考虑在工作台面总尺寸不变的情况下,根据横向筋板的不同厚度情况,综合考虑其对横向筋板的布置位置上、下限的影响,结合其他各板的厚度变化,进行满足刚度条件下的横梁质量最优化设计,从而能够获得满足现有工艺条件下的下横梁最优设计结构。

2 优化模型的建立和求解

2.1 设计变量的选取

根据灵敏度分析结果和下横梁参数化建模的可行性,又考虑到凸台宽和下横板位置有关联,现选取 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_6 、 x_8 、 x_{11} 6 个参数作为主要设计变量,记为: $X = (x_1, x_2, x_3, x_6, x_8, x_{11})^T$ 。

2.2 约束条件

由于焊接需要保留最小横板间距为 300 mm,所以 x_9 最小值取 150 mm。若横向筋板厚度 x_6 改变, x_{11} 、 x_9 和 x_{10} 的取值范围都会改变。限于篇幅,这里仅给出当 $x_6 = 60$ mm 时

各设计变量可行域,如式(2)所示,其他情况类似。

$$\left. \begin{aligned} 90 \leq x_1 \leq 150 \\ 50 \leq x_2 \leq 100 \\ 30 \leq x_3 \leq 80 \\ 200 \leq x_8 \leq 240 \\ 300 \leq x_{11} \leq 490 \\ 2x_6 + x_8 + x_{11} \leq 850 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于强度,一般要求厚所受的最大应力不超过自身材料的最大许用应力,即:

$$g_1(X) = \sigma_{\max} - \bar{\sigma} \leq 0 \quad (3)$$

式中: σ_{\max} 是下横梁所受的最大应力; $\bar{\sigma}$ 是下横梁的最大许用应力 147 MPa。

另外,根据液压机设计要求,下横梁工作台面的垂直变形需 $<0.2 \text{ mm/m}$,由工作台上找出最大垂直位移和立柱中心线位置位移,根据式(4)计算得到。

$$G = \frac{|\delta_1 - \delta_2|}{L} \leq 0.2 \text{ mm/m} \quad (4)$$

式中: δ_1 为工作面最大竖直位移; δ_2 为工作台上立柱中心线处的竖直位移; L 为下横梁跨度(即左右立柱中心线距离)。

2.3 优化目标函数

本文优化设计的目的是在不降低原设计刚度的条件下,找到梁质量最小的最优筋板布置结构设计方案,故指定下横梁的质量为优化目标。其数学表达式为:

$$\min(M) = \rho \sum_i^m V_i \quad (5)$$

其中: V_i 是单元的体积; m 是网格划分的单元总数。

2.4 优化近似模型的求解

本文采用优化拉丁超立方试验设计在设计空间上生成样本点,样本设计点个数为 120 个,误差分析样本点为 60 个。这些样本点通过调用有限元参数化模型输入文件得到新的参数模型,由输出文件计算出相应的响应值,然后运用径向基函数(RBF)神经网络法构建近似模型。近似模型本身都存在一定的误差,所以需要检验近似模型精度。采用复相关系数 R^2 值检验近似模型的精度,可接受水平为 0.9。验证近似模型精度后运用序列二次规划法分别对横向筋板厚分别为 50 mm、55 mm、60 mm、65 mm、70 mm、75 mm、80 mm 时的下横梁结构优化模型进行求解并验证,在 Isight 中最大迭代次数设置为 100,相对步长为 0.001 和最小绝对步长为 0.0001,其他参数都是默认值,优化流程如图 3 所示。

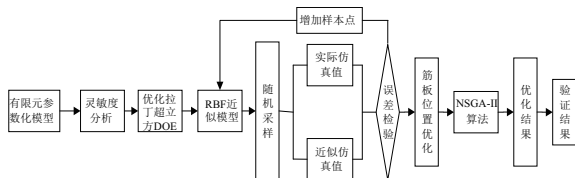


图 3 下横梁筋板位置优化流程图

下横梁横向筋板厚度 x_6 初始优化值分别取 50 mm、55 mm、60 mm、65 mm、70 mm、75 mm、80 mm,优化初始设计值为 $X = (120, 80, x_6, 220, 460)^T$ 。经过多次迭代得到优化结果,求解迭代过程见图 4。

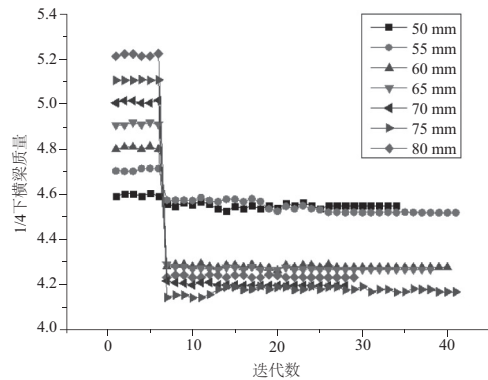


图 4 下横梁优化迭代过程

3 优化结果及讨论

将对应于横向筋板厚度 x_6 不同取值的优化结果列于表 2,从表中可知,对于不同的横向筋板厚度 x_6 ,其最优筋板布置位置不同。 x_6 越大, x_8 和 x_{11} 都相应减小。也就是说,横向筋板厚度越大,则筋板的布置越趋向于均匀分布,而且上面板和下底板的厚度相对减小。反之,横向筋板厚度越小,则内部两个筋板的布置越趋向于梁对称中线收缩,同时上面板和下底板的厚度则需要增大以保持梁的刚度。而纵向筋板的厚度对箱梁横向弯曲变形刚度贡献较小,其板厚可以取小值,以降低梁的质量。这些变化趋势符合箱梁横向弯曲变形的特性。综合上述结果,给工程上的设计建议是取横向筋板厚度为 70 mm 的方案比较合适,此时面板厚度为 110 mm,底板厚度为 50 mm。在保持刚度不下降的前提下,质量降至 4.23 t。

表 2 优化结果

x_6 / mm	x_1 / mm	x_2 / mm	x_3 / mm	x_8 / mm	x_{11} / mm	每米变形 量/(mm/m)	1/4 下梁 质量/t
50	150	54	55	244	494	0.195 1	4.54
55	150	53	55	238	483	0.193 2	4.51
60	148	51	30	234	469	0.192 1	4.27
65	126	54	30	229	462	0.191 8	4.26
70	109	50	30	226	454	0.191 4	4.23
75	98	51	30	212	449	0.191 2	4.19
80	90	50	30	202	443	0.188 2	4.17

任取一组优化结果验证优化近似模型误差是否在接受范围,经 $x_6 = 60 \text{ mm}$ 数据计算后比较可知,有限元模型与优化近似模型每米变形量和质量相对误差分别为 1.67% 和 1.2%,在有限样本点内误差可接受。为了验证优化后结构方案的可行性,根据钢板厚度国家标准,将表 2 中 $x_6 = 60 \text{ mm}$ 的优化结果,应用到下梁实际设计中,以便

于对优化前后下梁的力学性能进行比较,对比结果如表 3 所示。

表 3 有限元分析结果和优化结果比较

设计变量和目标值	原结构	优化后
x_1 /mm	120	150
x_2 /mm	80	50
x_3 /mm	60	30
x_6 /mm	60	60
x_8 /mm	220	234
x_{11} /mm	460	469
每米变量/(mm/m)	0.199 5	0.191 3
1/4 下梁质量/t	4.79	4.22

比较优化前后筋板位置图(图 5)、轴向变形图(图 6)及应力图(图 7)可知:横向筋板厚不变时,上横板布置位置 x_9 减小了 23 mm,下横板布置位置增加了 14 mm,横板间距增大了 9 mm。优化前最大应力为 95 MPa,优化后最大应力减小到 91 MPa,各应力分布更均匀。最大轴向变形从 0.230 8 mm/m 减小至 0.204 3 mm/m,每米最大变量为 0.199 5 mm 减小到 0.191 3 mm,刚度提高了约 4.2%。从云图中可以看出优化后上面板工作台区域的轴向变形分布更均匀,这对于模具跨度大、自身刚度普遍较差的复合材料模压成型而言是有利的。下横梁质量也从 4.79 t 减小到 4.22 t,下降了约 12%。

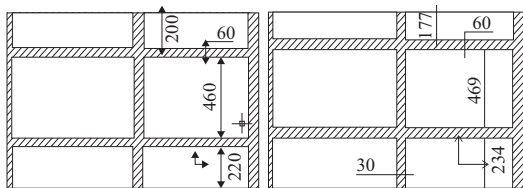


图 5 优化前(左)、后下横梁筋板位置

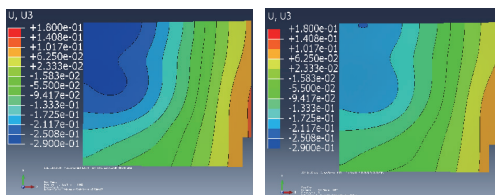


图 6 优化前(左)轴向变形和优化后轴向变形

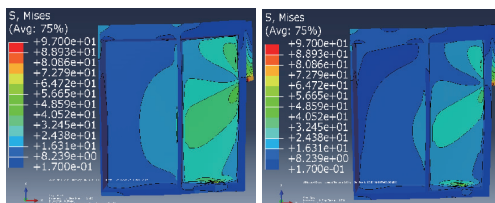


图 7 优化前(左)应力和优化后应力

4 结语

1) 通过对某型无立柱复合材料成型液压机的下横梁筋板结构位置的优化,可以得出如下结论:横向筋板厚度对箱梁的刚度影响最大,对应不同厚度的横向筋板,有着不同的最优布置方式;筋板厚度越大,其布置位置由中间收缩逐渐往均匀分布变化,而上下板及纵向筋板的厚度可以适当减小,在保证刚度不变的前提下以降低下横梁的自身质量。

2) 本文忽略了纵向筋板位置布置的优化问题,下一步将对横、纵向筋板位置和相关板的厚度及数量都作为设计变量的刚度最大化和质量最小化的多目标优化问题进行研究,以进一步提高下横梁的综合性能。

参考文献:

- [1] 林谢昭. 液压机机架力学特性分析及轻量化设计[D]. 福州: 福州大学, 2014.
- [2] 冯瑞年. YA32-500 四立柱液压机结构有限元分析和优化设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [3] 丁曾飞. 四柱式液压机有限元分析及优化[M]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [4] 赵万军, 张大可. ANSYS 中基于参数化的液压机结构优化设计[J]. 机械设计与制造, 2007(12): 6-8.
- [5] 金有昌. RZU2400 型液压机下横梁结构优化设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [6] 刘奎奎. 液压机机身有限元分析与优化[M]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [7] Wei Wei. Structure Optimization for Hydraulic Press Based on Approximate Model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 442: 287-290.
- [8] Wan JunZhao, Zheng HuaDeng, Hua JuTeng. Structural Optimization Design for Lower Beam of Hydraulic Press with the Casting Process Requirement[J]. Advanced Materials Research, 2013, 655: 386-389.
- [9] C Zhang, H Yu, L Zhang, et al. Structure Performance Sensitivity Analysis of Hydraulic Press Upper Beam[J]. International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2010(2): 419-422.
- [10] X Yin, MJ Zhu, AM Ji. Design and Optimization of Beam Based on ISIGHT and ANSYS[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 686: 160-163.
- [11] J Pan. Structural optimization of hydraulic press upper beam based on MeshWorks/Morpher and Isight[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2011, 48(12): 77-80.
- [12] 蒋准同, 李明, 李亮, 等. 基于 ANSYS Workbench 的蒸压砖机下横梁结构优化设计[J]. 机械设计与制造工程, 2015(5): 82-85.
- [13] 刘星, 陆宝春, 田先春, 等. 基于遗传算法的液压机上梁交互式结构优化[J]. 机械科学与技术, 2015(1): 28-31.
- [14] 曹文钢, 曾金越. 液压机上横梁有限元分析及结构优化[J]. 锻压装备与制造技术, 2013(5): 38-40.
- [15] 李艳聪. 机械压铸件成形精度的液压机主机结构设计方法研究[M]. 天津: 天津大学, 2010.
- [16] 李建福. 灵敏度分析方法及其在机械优化设计中的应用[M]. 烟台: 烟台大学, 2010.

收稿日期: 2018-03-05