

基于 Altair OptiStruct 的精冲压力机机架结构分析与拓扑优化

Structural Analysis and Topology Optimization of a Fine Blanking Press Frame Based on Altair OptiStruct

赵新浩 刘艳雄

(武汉理工大学 湖北武汉 430070)

摘 要: 机架是精冲压力机最重要的零部件之一。本文采用 Altair OptiStruct 对某公司生产的 12,000 kN 精冲压力机机架结构进行有限元分析和拓扑优化设计,并根据机架的结构特点,提出了两步拓扑优化的优化设计方法。有限元分析结果表明,与原始机架结构相比,优化后的机架结构在综合性能提高的情况下,体积(或重量)减少了 13.66%,成功实现了轻量化。本文所采用的优化方法和思路也可以推广至其他工程结构的优化设计当中。

关键词: Altair OptiStruct、精冲压力机机架、结构分析、拓扑优化

Abstract: Fine blanking press frame is one of the core components of the fine blanking press. In this paper, finite element analysis and topology optimization of a 12,000 kN fine blanking press frame was conducted based on Altair OptiStruct. A two-stage topology optimization procedure was proposed according to the frame structure characteristics. Ultimately, an optimized CAD model for the frame was constructed, and finite element analysis showed that 13.66% volume (or weight) reduction was achieved while the overall performance increased compared with the original frame. The optimization method adopted in this paper can also be extended to the optimization design of other engineering structures.

Key words: Altair OptiStruct, fine blanking press frame, structural analysis, topology optimization

1 概述

精冲压力机是用来实现精冲工艺的专用三动式压力机,在汽车、电子、军工、航空航天等工业领域得到了广泛应用。机架是精冲压力机最重要的零部件之一:一方面,它除了安装固定其它零部件之外,还要承受全部的工作载荷,因此其强度、刚度和动态特性等机械性能直接影响整机的工作性能;另一方面,机架体积大、耗材多,通常精冲压力机机架重量占整

机重量的 60%左右,其结构轻量化对于整机的轻量化、减少生产和运输成本具有重要意义。因此,有必要对精冲压力机机架进行结构优化设计。

近年来,不少研究人员针对精冲压力机机架的优化设计方法展开研究。例如,文献[1]和文献[2]分别基于有限元分析对精冲压力机机架结构进行了改进和优化,但这种方法效率低下,缺乏理论深度,且很难接近最优的机架结构;文献[3]采用了较为先进的拓扑优化方法对精冲压力机机架结构进行优化设计,但采用常规的拓扑优化流程得到的优化结果中,存在大量材料堆积、细小结构等不规则结构,而精冲压力机机架一般是采用厚钢板焊接成的整体框架式结构,因此这样的优化结果不利于机架结构的再设计。本文采用 Altair OptiStruct 对某公司生产的精冲压力机机架结构进行有限元分析和优化设计,并根据机架结构特点提出了两步拓扑优化流程,有效地解决了上述问题。本文所采用的优化方法和思路也可以推广至其他工程结构的优化设计当中。

本文总体结构安排如下:第一部分是概述;第二部分是机架有限元分析,针对某公司生产的 12,000 kN 精冲压力机机架进行结构分析,提取性能参数,为后续机架拓扑优化提供参考;第三部分建立了机架拓扑优化的数学模型和有限元模型,并采用常规拓扑优化流程对机架进行优化设计,指出了其中存在的问题;第四部分基于对机架结构特点的分析,提出了两步拓扑优化流程,阐明了其用于机架结构优化的优点;第五部分对全文进行了总结。

2 精冲压力机机架有限元分析

2.1 机架结构介绍

图 1 所示为某公司生产的 12,000 kN 精冲压力机机架结构示意图。该机架是采用不同厚度(30 mm~390 mm)的 Q235-A 钢板焊接而成的整体框架式结构,并采用整体退火处理。由图 1 可以看出,该机架结构相对于 X-Z 平面和 Y-Z 平面对称。

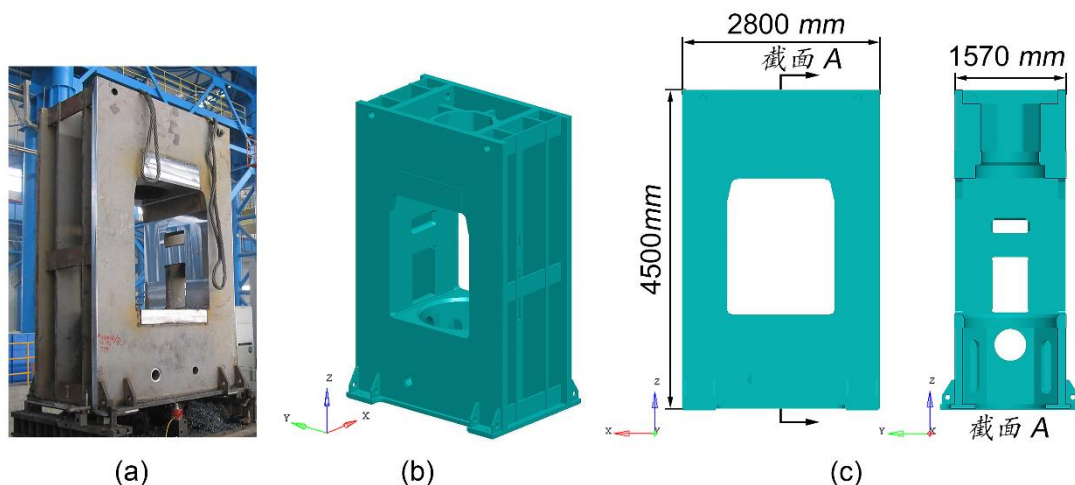


图 1 (a) 机架照片; (b) 机架三维模型; (c) 机架尺寸示意图

图 2a 所示为 12,000 kN 精冲压力机的结构示意图。可以看出，在精冲压力机工作过程中，机架承受来自主油缸和上工作台的工作压力；此外，精冲压力机采用八面导向机构，具有较好的导向性和抗偏载性能。图 2b 展示了机架的受力面和导向面位置（由于对称性，只标出两个导向面）。

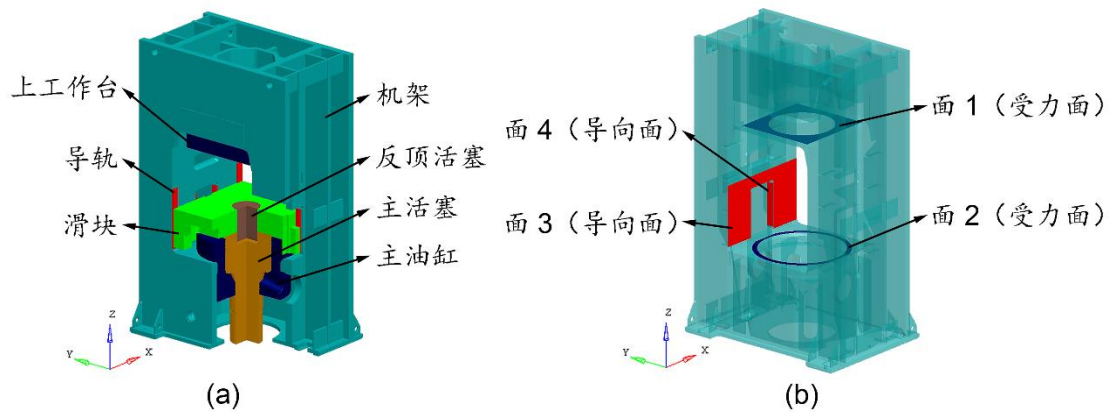


图 2 (a) 精冲压力机结构示意图；(b) 机架受力面和导向面示意图

为保证精冲压力机的工作精度，机架应满足以下工作要求：1）具有较好的结构强度，最大工作应力应在许用应力范围内；2）具有较好的整体刚度，一般情况下，额定载荷下的结构应变能或柔度（Compliance）越小，则整体刚度越好；3）具有足够的局部刚度，即受力面和导向面的变形要在指定范围之内；4）具有良好的动态特性，要求机架的固有频率远离激振频率，以避免共振，一般要求低阶固有频率越高越好。在接下来的有限元分析中，将从以上四个方面提取机架的机械特性。

2.2 有限元模型的建立

首先在三维建模软件中建立的机架三维模型（如图 1b 所示），导出为.step 格式，然后导入 HyperMesh 中，建立机架结构分析的有限元模型。有限元建模要点包括以下方面：

1) 单元和节点：采用实体单元建模，共包含 765,388 个四面体单元和 186,188 个节点；将导向面上的节点采用 RBE3 单元连接在一起，以方便提取在静载作用下导向面的变形情况；考虑到主油缸和上工作台与机架接触会增大受力面的刚性，因此采用 RBE2 刚性单元将受力面上的结点连接在一起，以方便施加载荷以及提取静载作用下受力面的变形；

2) 材料模型：采用线弹性材料模型，Q235-A 的材料属性为，杨氏模量 $E=212 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.288$ ，密度 $\rho=7.86 \text{ kg/m}^3$ ；

3) 约束的定义：机架通过四个地脚螺栓固定在地基上，因此约束机架与地面接触部位的 Z 向平移自由度，以及螺栓孔内节点的全部自由度；

4) 载荷的施加：直接在 RBE2 单元上施加集中载荷， $F=12,000 \text{ kN}$ ；

5) 载荷步的定义：定义两个载荷步，第一个是机架在静载作用下的静力分析，得到变形、应力等结果，第二个是机架的模式分析，得到其低阶模态频率和振型。

所建立的机架有限元模型如图 3 所示。

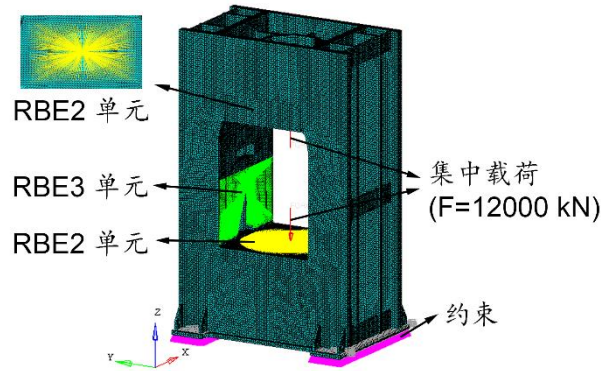


图3 机架有限元模型

2.3 有限元分析结果

将上述在HyperMesh中建立的机架有限元模型提交给求解器OptiStruct进行求解计算，并在HyperView中查看计算结果，进行后处理，得到机架在静载作用下的变形云图、应力云图和前五阶模态振型，如图4所示。提取机架体积 V 、最大应力 σ_{max} 、柔度 c 、受力节点变形量 d_{1z} 和 d_{2z} 、导向面变形量 d_{3y} 和 d_{4x} ，以及一阶固有频率 f_1 等性能参数，如表1所示。

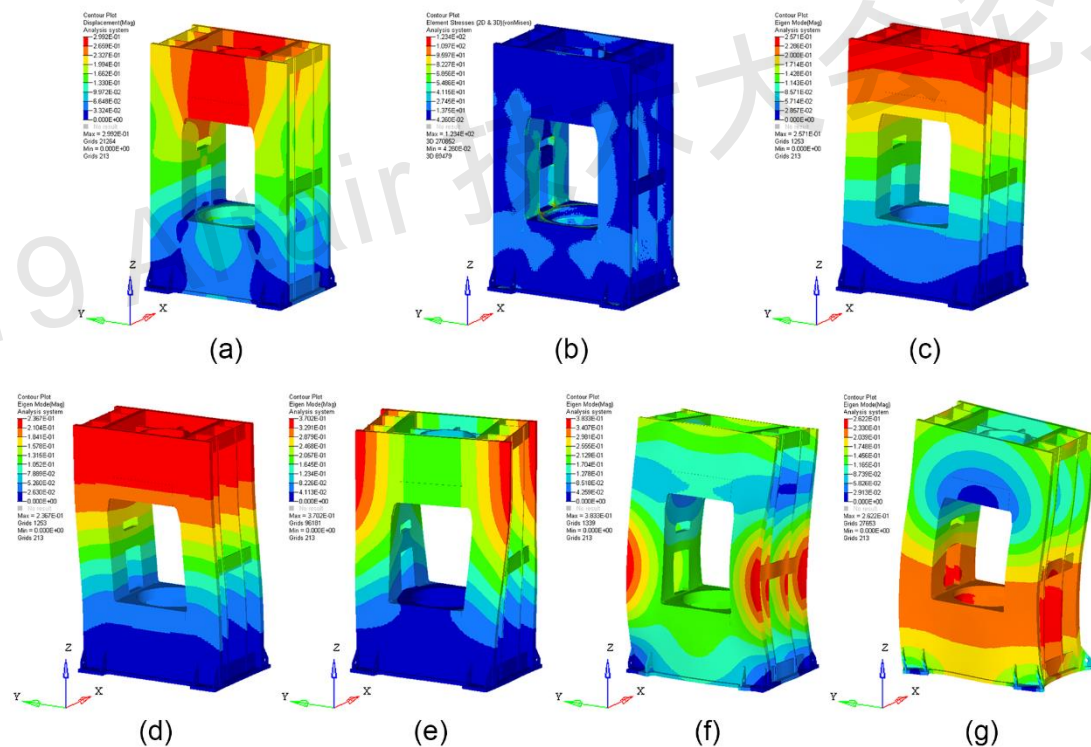


图4 机架有限元分析结果：(a) 变形云图；(b) 应力云图；(c) 一阶模态振型；(d) 二阶模态振型；(e) 三阶模态振型；(f) 四阶模态振型；(g) 五阶模态振型

表1 机架性能参数

V/m^3	σ_{max}/MPa	c/kJ	d_{1z}/mm	d_{2z}/mm	d_{3y}/mm	d_{4x}/mm	f_1/Hz
5.18327	123.4	2.471974	0.296	0.116	0.08673	0.003837	41.04213

3 机架的常规拓扑优化流程

3.1 机架拓扑优化的数学模型

优化设计有三要素，即设计变量、目标函数和约束条件。本文机架拓扑优化是基于变密度法中的 SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) 法，设计变量为单元的相对密度（该相对密度和材料参数之间存在某种函数关系），优化目标为机架体积最小化，约束条件包括最大柔度、受力面和导向面最大变形量以及最小一阶固有频率。优化的数学模型可简单表达式为：

$$\text{Find: } \rho_e \left(0 \leq \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1, k_e = (\rho_e)^p k_0 \right)$$

$$\text{Minimize: } \Delta = \frac{V}{V_0} = \frac{\sum_{e=1}^N \rho_e v_e}{\sum_{e=1}^N v_e}$$

$$\text{Subject to: } c \leq C, d_{1z} \leq D_{1z}, d_{2z} \leq D_{2z}, d_{3y} \leq D_{3y}, f_1 \geq F_1$$

式中， ρ_e 代表第 e 个单元的相对密度， ρ_{\min} 表示单元相对密度的最小值（用来避免产生数值问题）， k_e 和 k_0 分别表示第 e 个单元刚度和原始材料刚度， p 为惩罚因子（此处 $p=2$ ）， Δ 表示体积分数， V 和 V_0 分别是优化后和优化前的机架体积， N 代表总的单元数， v_e 代表第 e 个单元体积， C 和 D_{1z} 、 D_{2z} 、 D_{3y} 分别是 c 、 d_{1z} 和 d_{3y} 的上限， F_1 为 f_1 的下限。

根据前文第 2.3 节的机架有限元分析结果，此处约束条件的上下限取值如下： $C=2.47$ kJ， $D_{1z}=0.296$ mm， $D_{2z}=0.116$ mm， $D_{3y}=0.0867$ mm， $F_1=41$ Hz。

3.2 机架拓扑优化的有限元模型

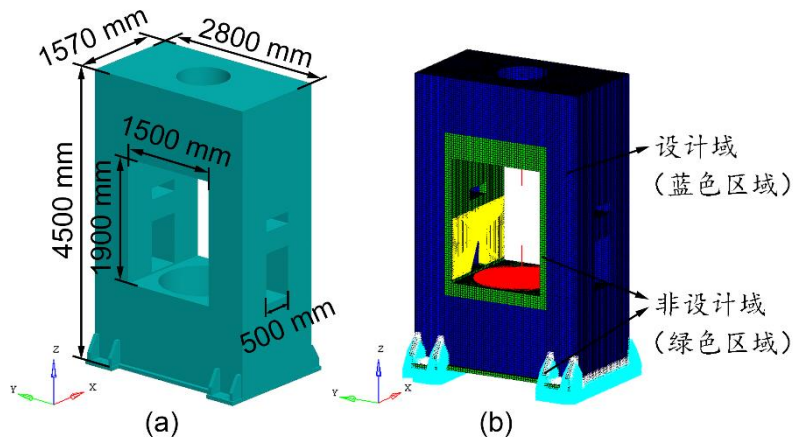


图 5 (a) 机架拓扑优化的设计空间；(b) 机架拓扑优化的有限元模型

首先，依据现有机架的结构形式及尺寸，在三维建模软件中建立拓扑优化设计空间的三维模型，如图 5a 所示。然后将该三维模型导出为 .step 格式，导入 HyperMesh 中建立拓扑

优化的有限元模型，如图 5b 所示。该模型包含 463,400 个六面体单元、5,356 个五面体单元、2 个 RBE3 单元以及 2 个 RBE2 单元，材料属性、载荷、约束等的定义与前文第 2.2 节机架有限元模型的定义方式一致。其中，蓝色区域定义为设计域，绿色区域定义为非设计域。

在本次拓扑优化过程中，考虑到机架结构关于 X-Z 平面和 Y-Z 平面对称，因此采用了 OptiStruct 提供的一种制造工艺约束——模式重复约束（Pattern repetition）。模式重复是指通过指定零件某一区域或多个区域的结构样式和另一区域保持一致，或某方向进行比例缩放，从而减少工艺设计和制造加工的工作量。本次优化模式重复约束的定义方式如图 6 所示，首先通过对称面将设计域分为四个区域，其中一个定义为主设计区（Master domain），另外三个定义为从设计区（Slave domain），并通过局部坐标的方式确定主、从设计区的位置关系，局部坐标采用选择 4 个节点（分别是 CAID、CFID、CSID 和 CTID）的方式定义。

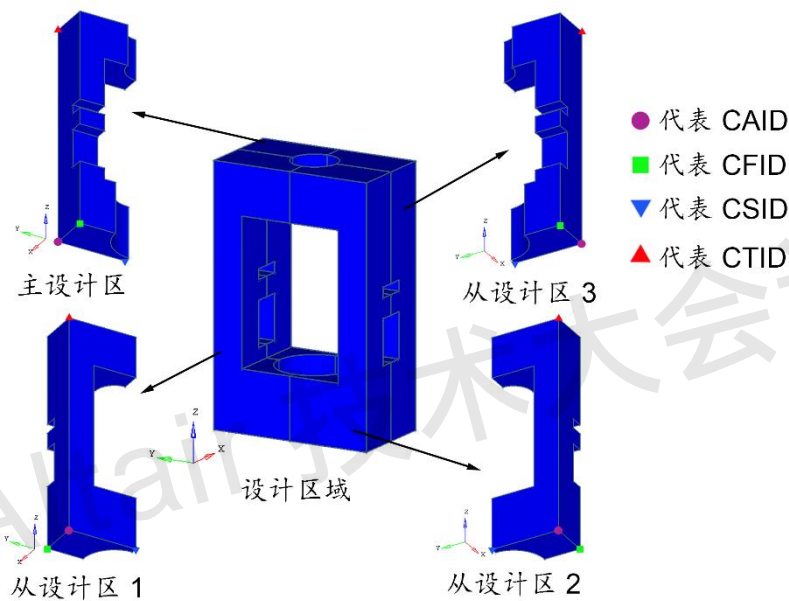


图 6 模式重复约束（Pattern repetition）的定义方式

3.3 拓扑优化结果

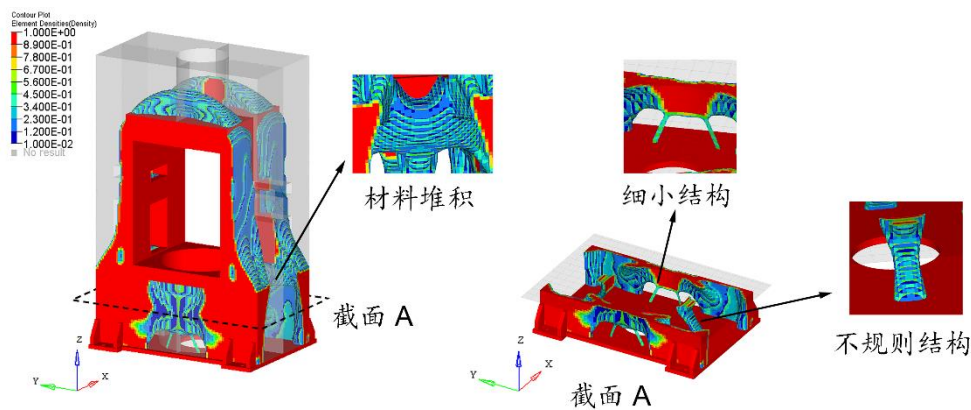


图 7 采用常规拓扑优化流程得到的优化结果

将上述拓扑优化模型导入到求解器 OptiStruct 中进行求解计算，经过 43 个迭代步之后，

结果收敛。在 HyperView 中查看优化结果，并进行后处理。将密度阈值设置为 0.3，只显示相对密度大于 0.3 的单元，得到的结果如图 7 所示。不难发现，采用常规拓扑优化流程优化得到的结果中，含有材料堆积、细小结构等等多种不规则结构，而精冲压力机机架通常采用厚钢板焊接而成，其结构形状规则，因此这样的优化结果显然不利于机架结构的再设计。

4 机架两步拓扑优化流程

4.1 问题分析

由上述分析可知，采用常规的拓扑优化流程无法得到结构清晰、易于再设计的机架优化结果，因此，有必要对机架结构特征作进一步分析，寻求新的拓扑优化流程。如图 8a 所示，不难发现，若将机架分为上、中、下三部分，则每部分在 Z 轴方向上的截面几乎保持一致。OptiStruct 提供了一种名为挤压约束（Extrusion）的制造工艺约束，通过指定挤压方向，可以使材料沿挤压方向的横截面保持一致。因此，可以按照图 8b 所示的方式，将主设计区分为三个部分，每部分沿 Z 轴建立挤压方向，从而获得结构清晰、易于再设计的优化结果。然而，加入过多制造工艺约束，会在一定程度上限制寻优过程，从而无法得到机架的最优拓扑结构。因此，有必要对上述优化结果再进行一次拓扑优化。

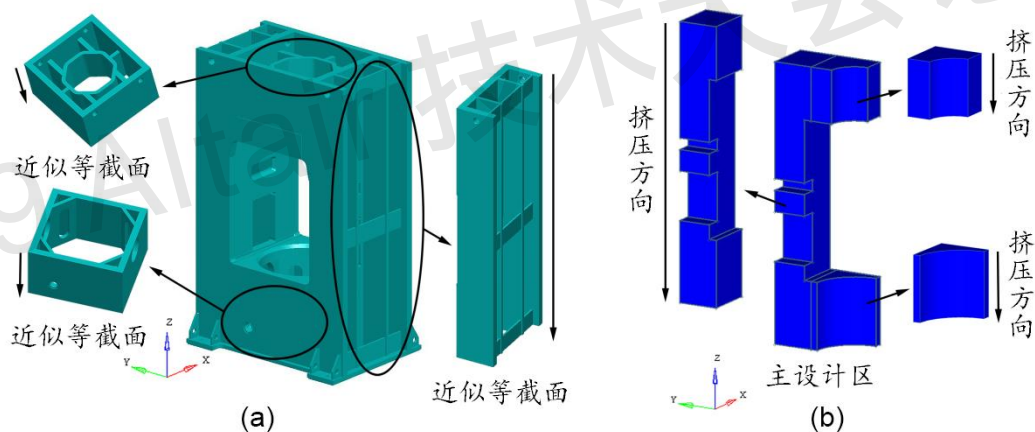


图 8 (a) 机架结构特征分析；(b) 挤压约束（Extrusion）施加方式

基于上述分析，本文对常规的拓扑优化流程进行了改进，提出了一种两步拓扑优化的优化方法，具体流程为：在第一步拓扑优化中，加入模式重复约束和挤压约束两种制造工艺约束，以获得结构清晰、易于再设计的优化结果，并对机架结构进行重新设计；在第二步拓扑优化中，不再使用挤压约束，以第一步重新设计的机架结构为设计空间再次进行拓扑优化，最大限度地去除材料，以获得机架的最优拓扑结构，并对机架结构进行最终设计。

4.2 第一步拓扑优化

按照上述优化思路对前文第 3.2 节常规的拓扑优化模型进行改进，加入挤压约束，并提交 OptiStruct 进行求解计算。经过 36 个迭代步后，结果收敛。在 HyperView 中进行后处

理，查看结果。第一步拓扑优化结果如图 9 所示（相对密度阈值为 0.3），可以看出，加入挤压约束后的优化结果，其 Z 轴方向上截面保持一致，且形状较为规则，容易实现机架结构的再设计。根据第一步拓扑优化结果，对机架结构进行重新设计，设计流程如图 10 所示。

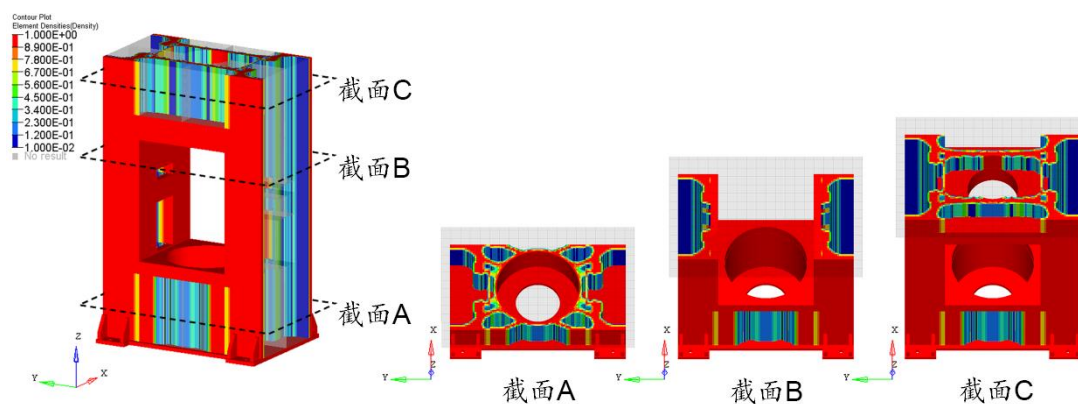


图 9 第一步拓扑优化结果

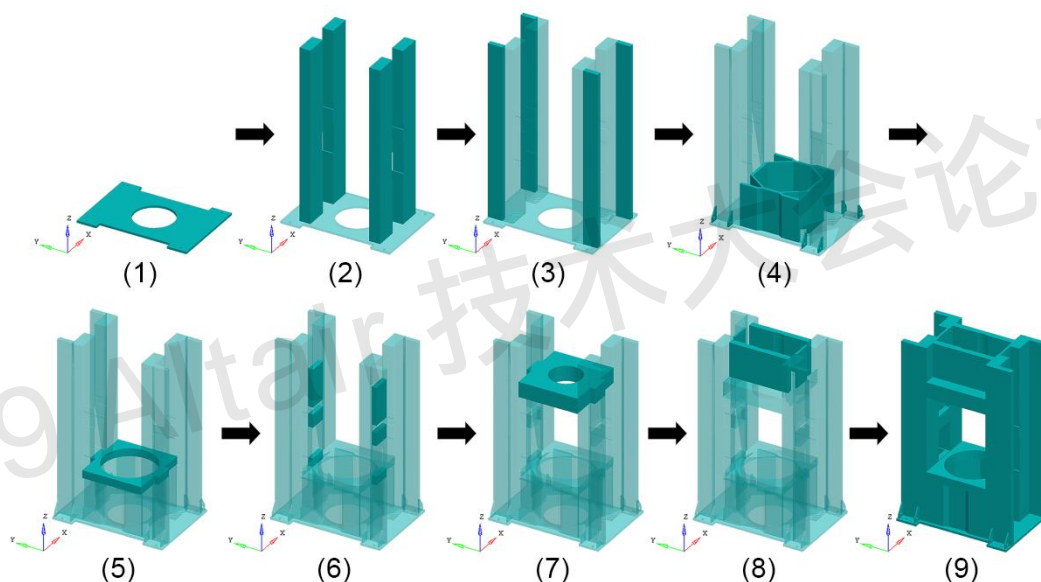


图 10 根据第一步拓扑优化结果对机架结构进行重新设计

4.3 第二步拓扑优化

基于第一步拓扑优化及机架结构重新设计的结果，在 HyperMesh 中建立第二步拓扑优化的有限元模型。建模方法和要点与前文第 3.2 节的建模类似，此处不再赘述。建立的有限元模型如图 11 所示。将该模型提交 OptiStruct 进行求解计算，并在 HyperView 中进行后处理，查看第二步拓扑优化结果，如图 12 所示（相对密度阈值为 0.3）。

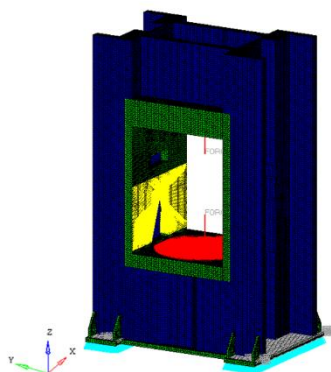


图 11 第二步拓扑优化有限元模型

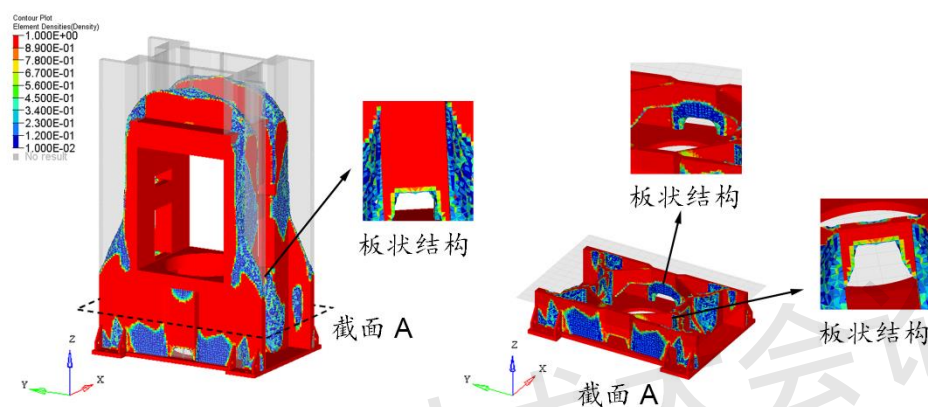


图 12 第二步拓扑优化结果

通过图 12 与图 7 对比可以看出，虽然二者优化结果的外形比较相似，但后者多为板状结构，形状更规则，更易于实现机架结构的再设计。基于此优化结果对机架结构进行了最终设计，优化后的机架结构如图 13 所示。

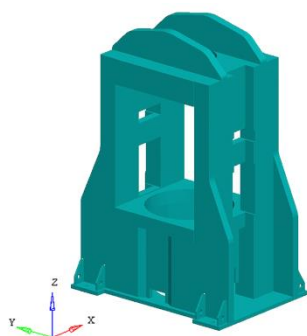


图 13 优化后的机架结构

4.4 优化后的机架结构分析

为了验证优化后机架结构的合理性，对优化后的机架结构再次进行了有限元分析。有限元建模方法与前文第 2.2 节的建模方法一致，此处不在赘述。有限元分析结果和性能参数如图 14 和表 2 所示。

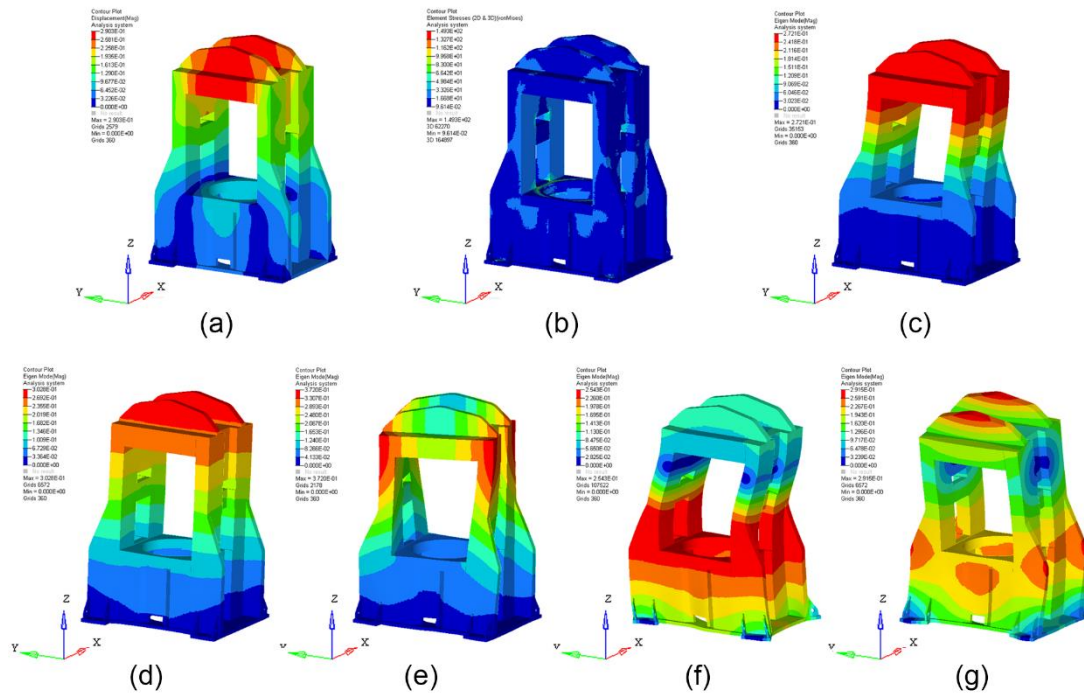


图 14 优化后机架有限元分析结果：(a) 变形云图；(b) 应力云图；(c) 一阶模态振型；(d) 二阶模态振型；(e) 三阶模态振型；(f) 四阶模态振型；(g) 五阶模态振型

表 2 优化后机架性能参数

V/m^3	σ_{max}/MPa	c/kJ	d_{1z}/mm	d_{2z}/mm	d_{3y}/mm	d_{4x}/mm	f_1/Hz
4.47500	149.3	2.219515	0.2781	0.0918	0.08245	0.001692	46.50987

通过对比表 2 和表 1 的数据，可以发现：1) 优化后的机架体积减小了 13.66%，实现了机架轻量化目标；2) 优化后机架最大应力增加至 149.3 MPa，但仍在许用应力范围之内，对机架性能影响不大；3) 优化后机架的柔度减小了 10.21%，说明优化后机架的整体刚度得到了提升；4) 优化后受力面和导向面的变形量分别减小了 6.05%、2.09%、4.93%和 55.90%，说明优化后机架的局部刚度得到了改善；5) 优化后机架的一阶固有频率提高了 13.32%，说明优化后机架的动态特性得到了改善。

此外，通过分析优化后的机架结构特点，可以得到以下结论：1) 机架顶端为圆弧形，而不再是方形，在文献资料[4]中，作者论证了采用拱形结构的 A 型机架，其综合力学性能优于基于正方体机架模型的 O 型机架和 C 型机架，这与本次机架优化结果相一致；2) 机架材料分布更靠下，这是因为质量机架材料分布靠近约束部位、重心降低，有利于提高结构的固有频率，从而提高机架结构的动态特性。

5 总结与结论

1) 本文提出了一种基于 Altair OptiStruct 的精冲压力机机架两步拓扑优化流程（如图 15 所示），采用这种方法，可以得到结构清晰、易于再设计的机架优化结果，这种优化思路也可以推广至其他工程结构的优化设计中；

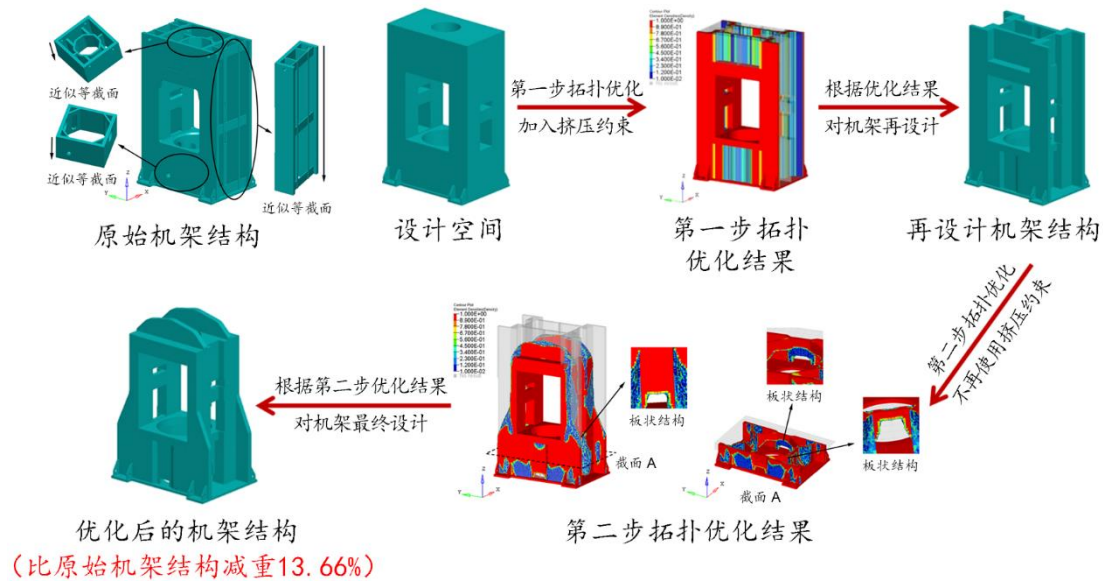


图 15 基于 Altair OptiStruct 的精冲压力机机架两步拓扑优化流程

2) 基于所提出的两步拓扑优化方法对 12,000 kN 精冲压力机机架进行了结构优化设计，得到了新的机架结构形式，且优化后的机架结构与原始机架相比，在综合性能提高的情况下，体积（或重量）减少了 13.66%，成功实现了轻量化；

3) 通过分析优化后机架的结构特点，得到两个结论，第一是机架顶部设计为圆弧形，有利于在保证机械性能的前提下，节省材料、降低生产制造成本，第二是材料分布靠近约束部位、重心低，有利于提高结构的动态性能。

6 参考文献

- [1] 吕琳, 邓明, 李艳霞, 等. 基于有限元分析的精冲液压机机身结构优化. 锻压技术, 2010, 35 (2): 102-106.
- [2] Yi, GD, Wu JD, Li RS. Static and Dynamic Deformation Analysis and Optimization of a Fine Blanking Press Frame. International Conference on Mechanical Design. Springer, Singapore, 2017.
- [3] Lan J, Hu JW, Song CP, et al. Modeling and optimization of a 10000KN fine blanking press frame. 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. IEEE, 2011.
- [4] 颜永年, 荆红, 张定军, 等. 重型承载机架的优化设计—论 1200 MN 液压机之一. 锻压技术, 2013, 38 (6): 1-13.
- [5] 王钰栋, 金磊, 洪清泉, 等. HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [6] 洪清泉, 赵康, 张攀, 等. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用. 北京: 机械工业出版社, 2013.