

基于Hyperworks的汽车零件轻量化设计

吴雅南, 李嘉诚

上海理工大学, 上海

收稿日期: 2022年12月28日; 录用日期: 2023年1月23日; 发布日期: 2023年1月30日

摘要

汽车零件的结构设计必须满足一定的刚度性能, 在保证刚度的前提下对汽车零件进行轻量化设计也是汽车结构设计的必经之路。现有该汽车零件的结构仍有轻量化空间, 并且现有拓扑优化还存在着一体化的设计困境, 即模型导入到分析软件的过程中存在数据丢失的问题。为了得到更加轻便的零件结构, 本文在Hyperworks中进行建模并使用OptiStruct求解器对汽车关键零件进行拓扑优化。在应变和体积比作为约束的条件下采用变密度法寻找体积最小值, 优化后的体积下至原来的55%, 同时优化后的最大应力与最大位移也得到相应的改善, 得到了较好的优化结果, 能为其他的汽车零件设计提供一定的参考。

关键词

轻量化设计, 拓扑优化, 汽车零件

Lightweight Design of Automobile Parts Based on Hyperworks

Yanan Wu, Jiacheng Li

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 28th, 2022; accepted: Jan. 23rd, 2023; published: Jan. 30th, 2023

Abstract

The structural design of automobile parts must meet certain stiffness performance. On the premise of ensuring the stiffness, lightweight design of automobile parts is also the only way of automobile structural design. The structure of the existing automobile part has any space for lightweight, and the existing topology optimization still has an integrated design dilemma; that is, there is a problem of data loss when the model is imported into the analysis software. In order to get a more portable part structure, this paper models in Hyperworks and uses OptiStruct solver to optimize the topology of key auto parts. Under the conditions of strain and volume ratio as constraints, the

variable density method is used to find the minimum volume. The optimized volume is reduced to 55% of the original volume. At the same time, the maximum stress and maximum displacement after optimization are also improved correspondingly, and a better optimization result is obtained, which can provide a certain reference for the design of other automobile parts.

Keywords

Lightweight Design, Topology Optimization, Automobile Parts

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人们的出行需求的增加, 汽车作为出行代步主要工具, 其各项功能的发展也越来越迅速。“安全、节能、环保”是目前汽车发展的三大主流方向, 而要实现安全、节能和环保, 汽车轻量化则是最佳途径之一[1]。

据相关数据表明: 汽车质量降低比例与汽车油耗比例之间的比值可达到 0.25。也就是一辆汽车每降低 1% 的质量, 其油耗就可以降低 5%~7%。从这些数据上可以看出汽车零部件轻量化在汽车结构设计中的重要性。在结构优化设计中目前主要分为: 尺寸优化、形状优化、拓扑优化三大分支。在轻量化设计过程中, 拓扑优化是最常用也是最有效的一种优化方法。

与尺寸优化和形状优化相比, 拓扑优化的经济效果明显, 发展前景广阔, 应用范围广泛, 在优化中产生新的构型, 是结构实现智能化设计广泛采用的设计方法[2]。

目前大部分优化方法主要基于嵌入域模型或者有限元的网格域等分析模型表达。比较常用的连续体拓扑优化方法有均匀化方法[3]、变厚度法[4]、变密度法[5]、渐近结构优化方法[6]等。这些方法都有各自的优势和缺陷。目前最常用的一种拓扑优化方法是变密度法[7]。

在整个汽车的轻量化设计中, 拓扑优化的应用是最广泛的轻量化设计, 也是轻量化效果最好的方法。针对上述汽车轻量化的要求, 对每个零件的轻量化是汽车整体实现轻量化节能化, 响应节能环保号召的必经之路。

在传统优化过程中, 建模与分析是前提, 而现有的方法无法实现建模、分析、优化的一体化。在对一体化的研究中, 我们发现模型的数据丢失也成为了结果不精确的重要原因之一。本文针对汽车关键部位零件结构, 为了满足车体的轻量化节能需求, 需要在满足应力增加不超过 20% 和刚度下降不超过 10% 的前提下将此零件的材料减小至原来的 60% 以下。本文在 Hyperworks 中进行建模、分析、优化, 避免了模型导入造成的数据丢失问题。本文选择变密度法对汽车零件进行拓扑优化, 以体积最小为目标函数, 建立体积比约束和位移约束。利用 Hyperworks 中的 Optistruct 求解器进行拓扑优化的求解计算, 并依据结果给出重建后的模型。本文的工作内容也为后续一体化的研究提供了参考。

2. 拓扑优化设计

拓扑优化最早是由 Maxwell 于 1854 年提出, 其中心思想是将寻求结构的最优拓扑问题转化为在给定的设计区域内寻求材料的最优分布问题[8]。

拓扑优化是将材料布置在既定的可设计区域内, 建立算法和规则分析材料的最优分布, 从而以最少的材料获得某项性能最佳的模型结构[9]。

变密度法在连续体拓扑优化中广泛使用, 并且优化后的模型效果好。本文采用变密度法, 将位移、体积比和柔度作为响应。以柔顺度作为优化目标, 以最大位移和体积比作为约束。

优化数学模型如下所示:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(X) = U^T K U \\ \text{s.t.} \quad & \frac{V(X)}{V} = f \\ & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ & X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \end{aligned} \tag{1}$$

X 表示设计变量; $C(X)$ 表示结构柔顺度; K 为刚度矩阵; U 为位移向量; u 为最大位移量; u_{\max} 为最大位移量上限值; u_{\min} 为最大位移量的下限值; X_{\min} 为设计变量下限; X_{\max} 为设计变量上限; V 为优化前体积; $V(X)$ 为每次迭代优化后体积变量; f 表示体积比。由于零件的体积量较大, 因此将体积比设定为 0.55。并且优化位移量不大与 2 mm。

3. 有限元模型建立

有限元是一种近似求解方法。在基于弹性力学的基础上, 将弹性体分割成数个小的计算单元[10]。当这些计算单元被分割的最够小的时候, 得到的计算结果就是精确结果。因此, 在有限元求解过程中, 网格划分这一步骤至关重要。本文在 Hypermesh 中对汽车零件采用 2 mm 的三角网格进行网格划分。由于本文后续需要在此汽车零件上进行拓扑优化, 需要划分设计域和非设计域, 如图 1 所示。

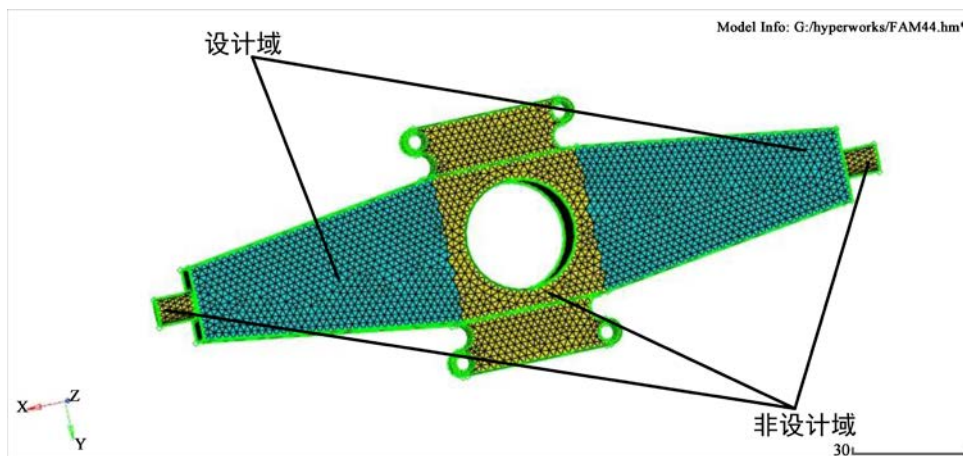


Figure 1. Grid division diagram of design domain and non design domain
图 1. 设计域和非设计域网格划分图

为了便于网格划分, 本文给出的零件图的模型, 将螺栓简化为圆孔。该汽车零件材料泊松比为 0.3, 弹性模量为 1.0×10^9 。模型工况如图 2 所示, 在上下两侧用于螺栓固定的凸台处由四个螺栓固定, 左右圆台处受大小为 10^4 N 的均匀分布的拉力。因此在螺栓固定处施加约束, 在两侧圆柱断面施加等效均布力。

$$F_x = \frac{q_n * S}{num} \tag{2}$$

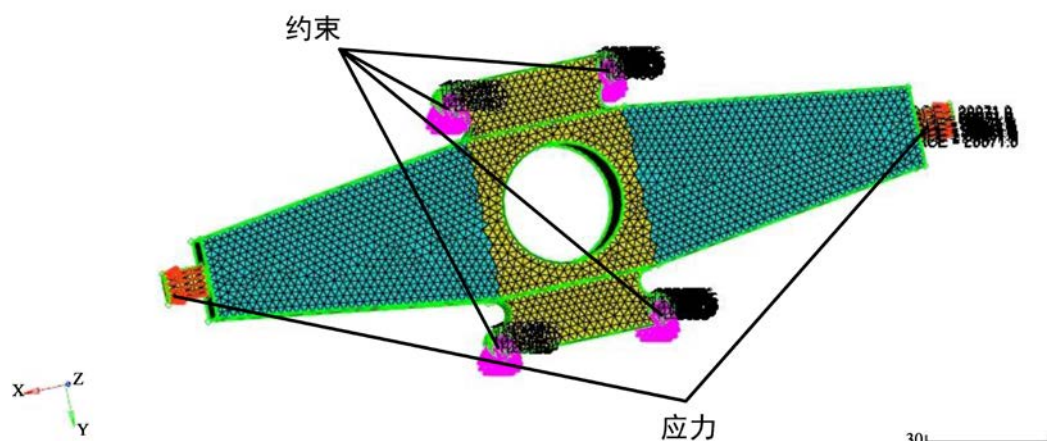


Figure 2. Actual working condition diagram of automobile parts
图 2. 汽车零件实际工况图

其中 F_x 表示等效均布力; $q_n = 10^4 \text{ N}$ 为实际均布拉力; S 为实际力的作用面; num 表示均布力作用面网格节点数。

4. 拓扑优化结果分析

经过上述材料及力和约束的设置, 在第 19 次迭代完成后完成目标函数的收敛, 即设计域的体积达到约束条件下的最小值。其迭代收敛图 3 所示。

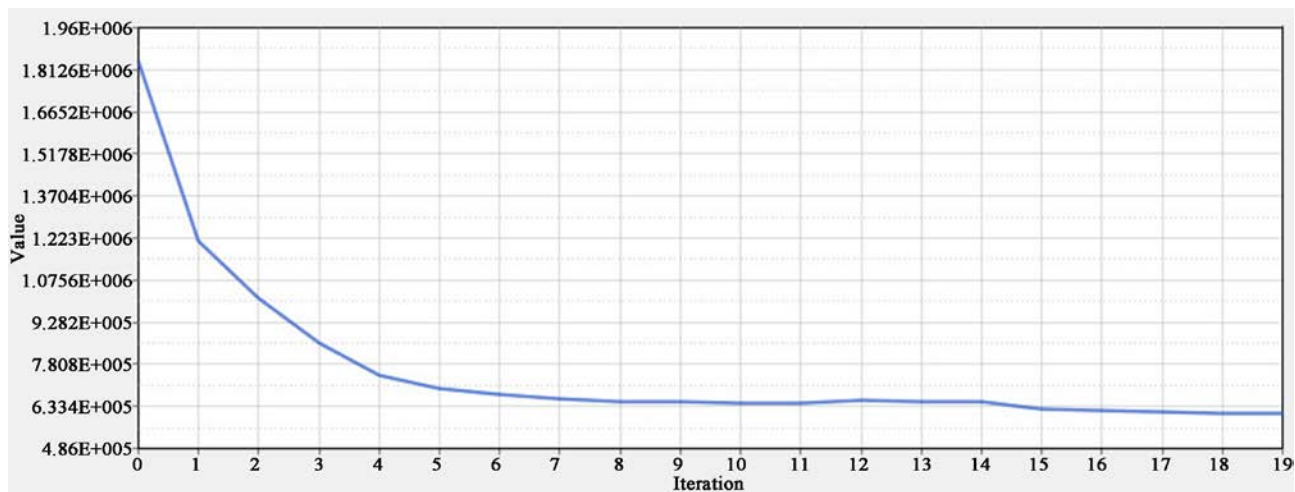


Figure 3. Convergence graph of topological optimization objective function
图 3. 拓扑优化目标函数收敛图

图 4 所示体积优化数据云中红色部分是高应力区域为可保留设计域, 蓝色部分材料密度数值小于 1 为可省略材料区域。可以从图 5 中观察到整个优化后模型的形貌。图 6 到图 9 中可以清晰地看出优化前最大位移为 6.263 mm 最大 Von Mises 应力为 $3.984 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, 优化后最大位移 1.641 mm 最大 Von Mises 应力为 $2.169 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。优化后的模型不仅体积下降至原来的 55%, 并且优化后模型的最大位移变量降低了 75% 最大 Von Mises 应力值降低了 45.5%, 也就是在此工况条件下模型的刚度和承重能力都有

所提升。因此针对该汽车零件, 本文优化方法可行。

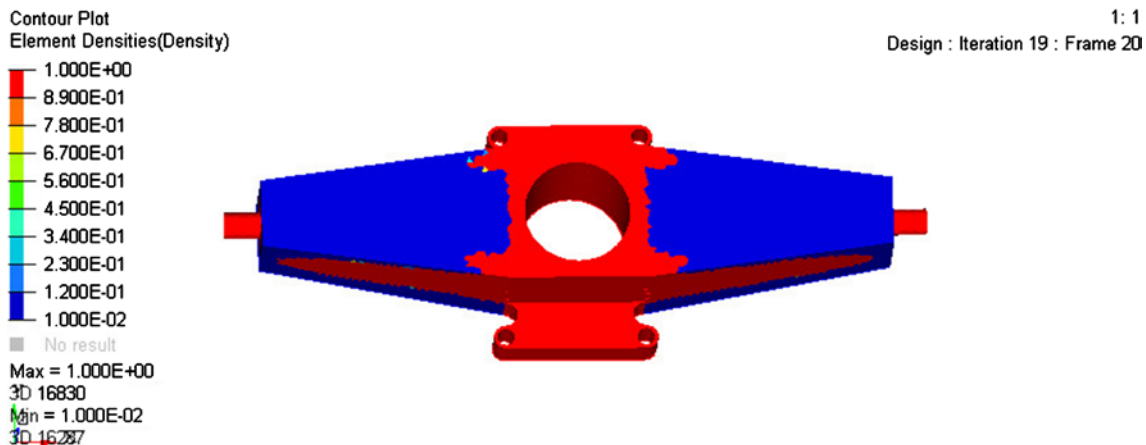


Figure 4. Volume optimized density nephogram
图 4. 体积优化密度云图

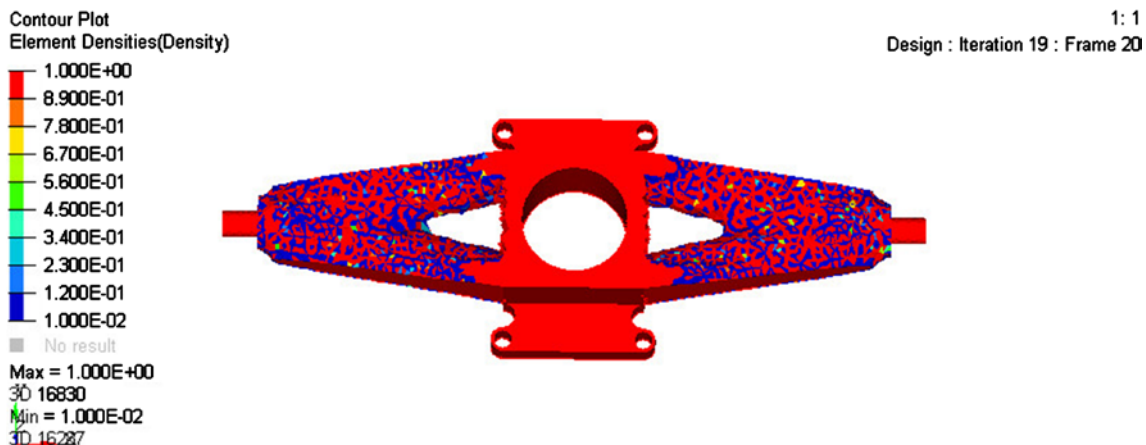


Figure 5. Model diagram after optimization
图 5. 优化后模型图

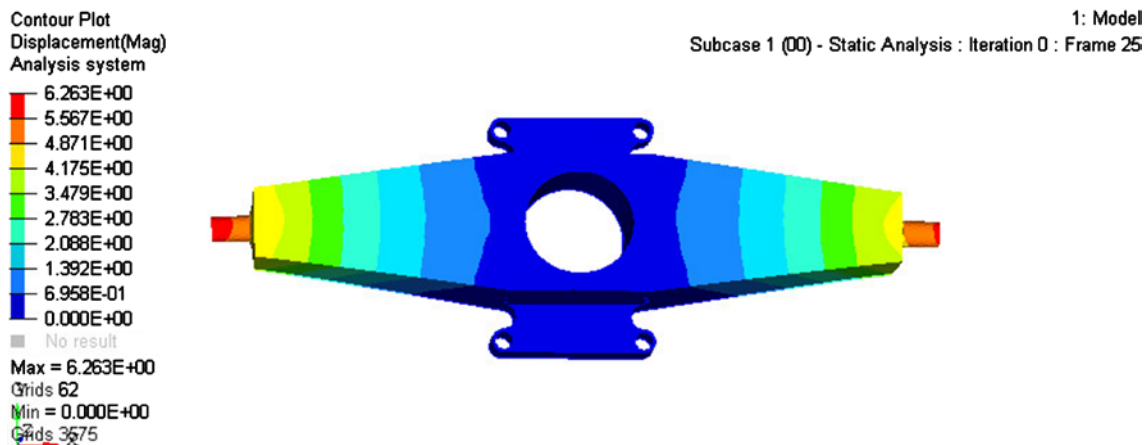


Figure 6. Displacement nephogram before optimization
图 6. 优化前位移云图

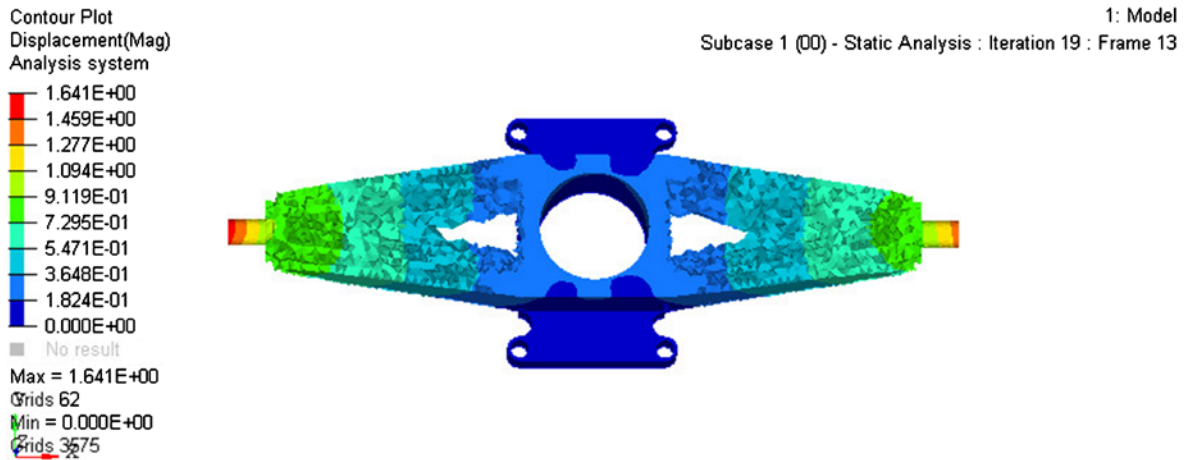


Figure 7. Displacement nephogram after optimization
图 7. 优化后位移云图

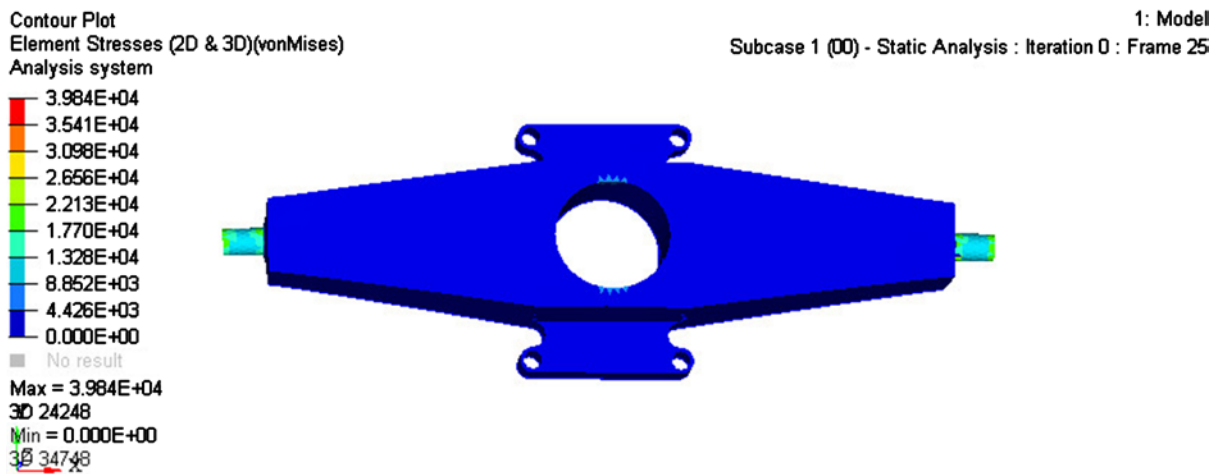


Figure 8. Von mises stress before optimization
图 8. 优化前范式应力云图

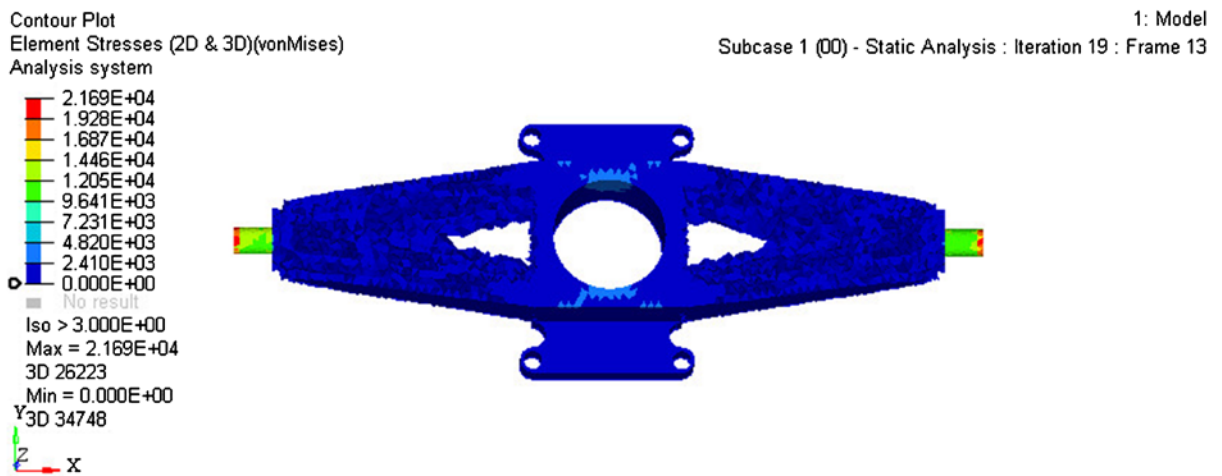


Figure 9. Von mises stress nephogram after optimization
图 9. 优化后范式应力云图

5. 拓扑优化结果重建

有限元方法是划分足够小的区域来近似计算模型在一定工况条件下的应力和位移情况。而拓扑优化是基于这一方法来进行相应的迭代计算的, 因此拓扑优化的结果也是在网格上显示分布结果的。由于有限元网格的存在, 直接优化后显示的模型大多会出现畸变的情况[11], 也就是在图 5 中显示的模型中可以看出: 模型表面会有坑坑洼洼的三角网格的拼接时产生的尖锐并且不平整的表面。如果要精确加工图 5 中优化后的模型, 显然在制造难度和零件成本方面是一个极大的挑战。为了便于加工制造、缩短交付期, 需要对拓扑优化后的模型进行后处理, 以便提高拓扑优化模型的边界及表面的光顺程度及拓扑优化结构的整体质量[12]。本文给出了设计后的零件图, 如下图 10 所示。图 11 和图 12 分别为后处理设计后的模型位移云图和范式应力云图。将图 11 和图 12 分别对比图 7 和图 9, 可以看出设计前后的模型位移与应力相差分别不超过 6% 和 16.5%。

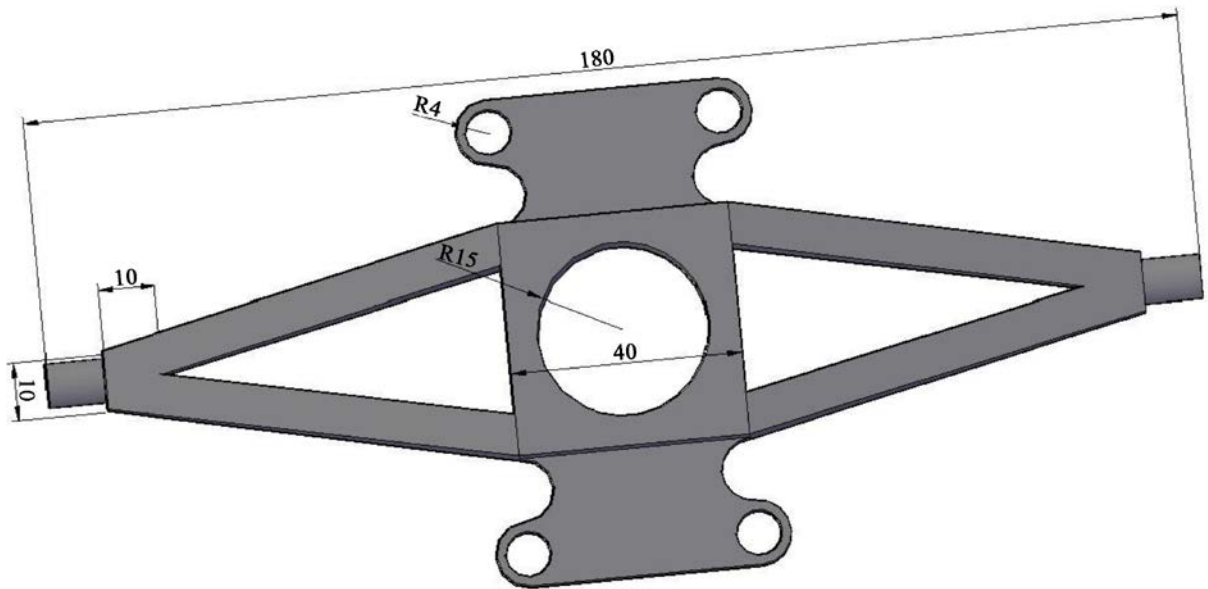


Figure 10. Design drawing of automobile parts after optimization
图 10. 汽车零件优化后设计图

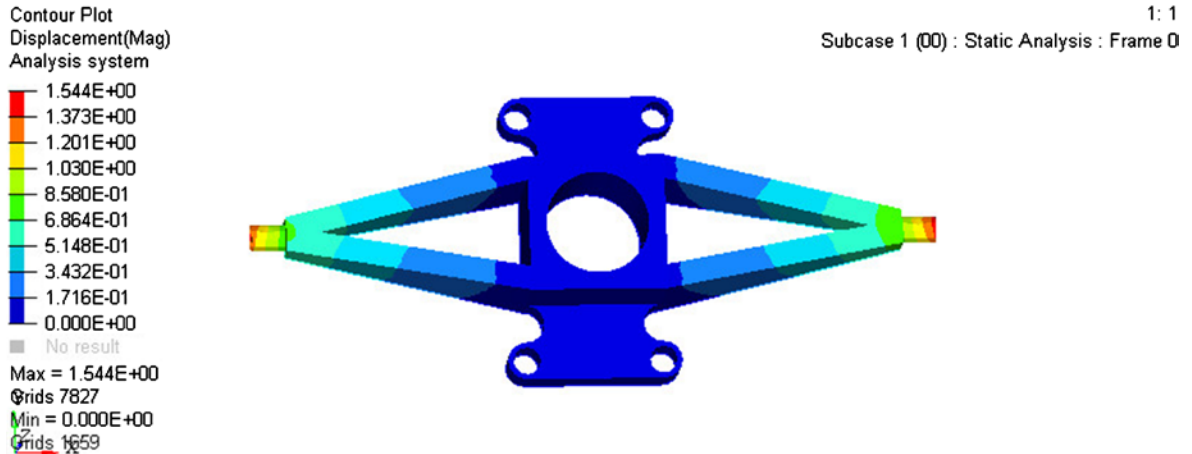


Figure 11. Displacement nephogram after design
图 11. 设计后位移云图

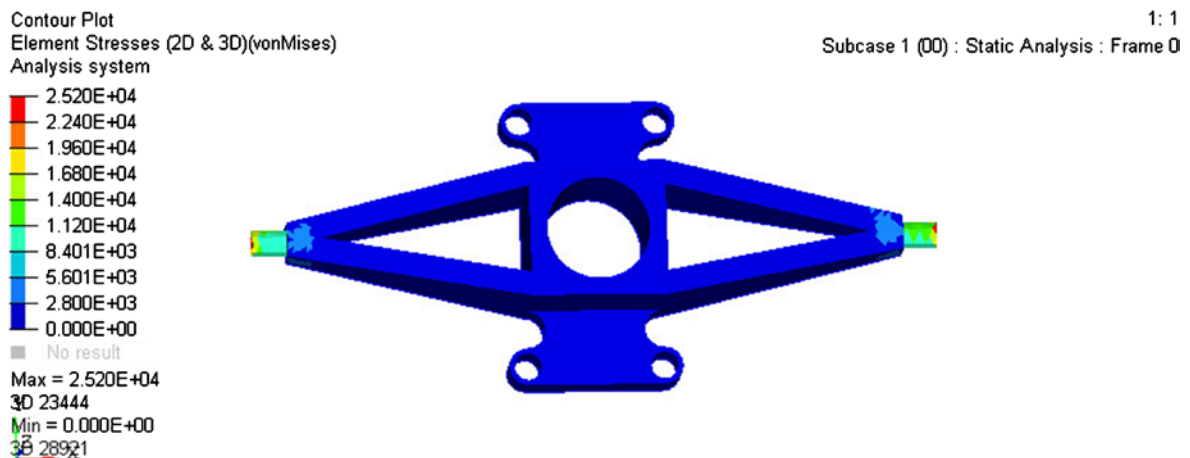


Figure 12. Stress nephogram of model normal form after design
图 12. 设计后模型范式应力云图

6. 结论

本文运用变密度法, 对位移约束进行改进, 对汽车关键部位零件进行拓扑优化设计。在满足应变减小的情况下, 总体积减小 45%, 刚度得到了相应的提高, 并依据拓扑优化结果对该汽车零件进行了结构重建, 从而完成了汽车零件的轻量化设计。本文的设计结果对汽车零部件的轻量化设计和一体化设计提供借鉴意义。

参考文献

- [1] 赵炳婕, 顾成波. 多学科设计优化在汽车零件轻量化中的应用[J]. 汽车零部件, 2018(12): 15-19. <https://doi.org/10.19466/j.cnki.1674-1986.2018.12.003>
- [2] 邱福生, 季武强, 徐厚超. 基于改进变密度法的飞机垂尾拓扑优化设计研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(1): 26-29.
- [3] Bendsøe, M.P. and Kikuchi, N. (1988) Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **71**, 197-224. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2)
- [4] 周克民, 胡云昌. 利用变厚度单元进行平面连续体的拓扑优化[J]. 天津城市建设学院学报, 2001, 7(1): 33-35.
- [5] Mlejnek, H.P. and Schirmacher, R. (1993) An Engineer's Approach to Optimal Material Distribution and Shape Finding. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **106**, 1-26. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(93\)90182-W](https://doi.org/10.1016/0045-7825(93)90182-W)
- [6] Xie, Y.M. and Steven, G.P. (1993) A Simple Evolutionary Procedure for Structural Optimization. *Computers & Structures*, **49**, 885-896. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(93\)90035-C](https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90035-C)
- [7] 邢号彬, 付燕鹏, 谭敦松, 傅强, 杨永超, 陈健. 复合材料尾门轻量化设计[J]. 上海汽车, 2017(2): 37-39.
- [8] 周克民. 结构拓扑优化的一些基本概念和研究方法[J]. 力学与实践, 2018, 40(3): 245-252.
- [9] 蔡安江, 杨奇琦. 基于变密度法的平模台振加强筋布局优化[J]. 计算力学学报, 2021, 38(1): 66-72.
- [10] 葛文杰, 张永红, 刘博, 张子昂, 李玉柱. 基于超弹性材料拓扑优化方法的变形翼结构设计[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12): 70-80. <https://doi.org/10.19452/j.issn1007-5453.2022.12.008>
- [11] 丁延冬, 罗年猛, 杨奥迪, 王书亭, 朱浩然, 谢贤达. Bézier 单元刚度映射下的高效多重网格等几何拓扑优化方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(23): 2801-2810.
- [12] Lazarov, B.S., Wang, F.W., Sigmund, O., et al. (2016) Length Scale and Manufacturability in Density-Based Topology Optimization. *Archive of Applied Mechanics*, **86**, 189-218.