

基于不同网格划分策略的连续体拓扑优化对比分析

邱 涛, 宋佳欣*, 师启博, 赵 宽

衢州学院, 浙江 衢州

收稿日期: 2021年10月28日; 录用日期: 2021年12月9日; 发布日期: 2021年12月16日

摘 要

将双孔连接板作为研究对象, 选择三种不同的网格划分方案进行静力学有限元分析, 得到对应的等效应力云图; 根据其受力情况, 进行结构拓扑优化。基于不同网格划分策略, 对比轻量化效果, 确定一种适合的网格划分方案。

关键词

拓扑优化, 有限元分析, 网格划分, 轻量化设计

Comparative Analysis of Continuum Topology Optimization Based on Different Meshing Strategies

Tao Qiu, Jiaxin Song*, Qibo Shi, Kuan Zhao

Quzhou University, Quzhou Zhejiang

Received: Oct. 28th, 2021; accepted: Dec. 9th, 2021; published: Dec. 16th, 2021

Abstract

Taking the double hole connecting plate as the research object and selecting three different meshing methods for static finite element analysis, obtain corresponding equivalent stress nephogram. According to the stress condition, the structure topology optimization design is carried out. Based on different grid generation strategies, contrasting lightweight effect, determine a suitable grid

*通讯作者。

generation scheme.

Keywords

Topological Optimization, Finite Element Analysis, Element Meshing, Lightweight Design

Copyright © 2021 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

随着机械制造业的发展,轻量化设计在航空航天、轨道交通、物流运输等领域逐渐受到重视。在不影响零件正常工作的大前提下,各类机械零件的加工和制造厂商通过优化零件结构,使零件尽可能轻量化和小型化,达到减少零件材料需求,降低零件制造成本的目标。目前机械零件使用较多的结构优化方法有尺寸优化、形状优化以及拓扑优化,即在设计区域内以约束边界和性能指标为设计条件,寻求材料最优分布的优化方式。

各领域的拓扑优化,大多都基于有限元分析法进行应用,这种方法是将模型离散为有限个单元体,针对各单元体进行数值求解,并根据计算确定设计空间内单元的去留,保留下来的单元体构成最终的优化模型。网格划分是有限元分析法重要的前处理,不同的网格划分方案会对网格的单元、质量、倾斜度等产生影响,进而影响拓扑优化的精确性。因此开展不同网格划分策略对机械产品拓扑优化效果的影响研究尤为重要[1]。

国内外学者对拓扑优化展开了较多的研究。SHIVANNA等[2]提出了基于特征的六面体多域网格自动生成法及其质量优化算法;Huang L L [3]等提出了一种改进的基于网格的算法,用于六边形元素网格的自适应生成和再生,并通过几个实例验证了该方法的有效性;占金青[4]等对拓扑优化进行分析和研究,提出了一种考虑静强度和疲劳约束的连续体结构拓扑优化的设计方法;古成中、吴新跃[5]研究了不同模型的网格划分问题,并提出不同网格对同一结构的适应性特点;王家鋈[6]等通过对网格整体控制和局部细化,对汽轮机内缸进行有限元分析,在结果合理的前提下提高了计算效率。王瑞[7]等也对六面体网格的生成与优化趋势进行了阐述。诸多学者在网格划分和拓扑优化方面取得了较多的研究成果,但目前针对同一模型,采用不同网格划分方案的拓扑优化结果对比与最优分析的研究较少,因而,开展不同网格划分策略的连续体拓扑优化结果对比分析十分必要。

本文采用自由网格划分、扫略网格划分、多区域混合网格划分三种不同的网格划分方案,以带符号的 von Mises 应力的数值来评定结构强度,分析比较连接板拓扑优化的结果,从而寻找一种最优的网格划分方案,对拓扑优化的应用提供参考。

2. 有限元模型建立和网格划分

2.1. 模型建立

双孔连接板是机械产品中较为常用的连接件,适用于不同零部件之间的连接、组装、运动以及能量传递。由于双孔连接板在不同场合下其长度、厚度、体积可能各不相同,为只讨论不同网格划分方式对拓扑优化结果的影响,本文将在保证模型结构特点和使用功能与实体相似的情况下对模型进行简化。简

化后的模型如图 1 所示。模型总体积(Volume)为 7135.7 mm^3 ，质量(Mass)为 $5.6015\text{e}-2 \text{ kg}$ 。

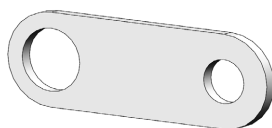


Figure 1. Model diagram of double-hole connecting plate before optimization

图 1. 优化前双孔连接板模型图

2.2. 网格划分

有限元网格划分是拓扑优化中至关重要的一部分，网格划分的质量会直接影响拓扑优化结果的精确性。通常高质量的有限元网格具有以下特征：① 所有网格单元接近理想单元形状；② 主要变量(温度、速度等)变化梯度较大的地方网格密度较大；③ 粗细网格之间过渡均匀。通过网格精整可以显著改善网格质量，即根据计算结果和实际工况对某些部分进行网格细化[7]。

通常情况下，网格数量越多，数值模拟精度就越高。但会投入更多的精力和时间，增加计算成本。有研究表明，当网格数量达到一定规模时，数值模拟精度和模型关键区域(如圆弧过渡区、倒角区、应力集中区)的网格数量、网格质量有较大相关性[8]。

双孔连接板模型两端呈圆形，在进行有限元分析时，有时会因为模型具有孔洞或曲率圆弧过渡结构，造成面连接错位的现象，使得自由网格和扫略网格划分出的网格不符合要求。这种情况下尝试多区域混合网格划分，能够根据需要模型分成若干个部分，以方便后续对各个部分采用合适的网格划分方法和单元类型。本文采用了自由网格划分、扫略网格划分、多区域混合网格划分三种方案对同一模型进行网格划分。由于方案不同，软件中利用的算法也不同，自由网格划分采用了四面体单元；扫略网格划分采用的是退化了的六面体单元(五面体单元)；多区域混合网格划分将模型分割成了三部分，其中连接板中间部分采用的是规整的六面体单元，圆弧附近采用映射法生成的六面体单元，映射法生成网格具有速度快，网格单元质量较好，网格密度可控等优点，为了提高计算结果的精确性，对圆弧部分区域进行了加密处理，加密网格如图 2 所示。

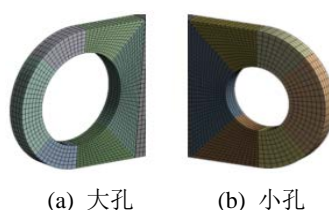


Figure 2. Local encryption of multi region grid

图 2. 多区域网格局部加密处理

在划分连接板模型的网格时，首先，控制整体网格单元大小为 1 mm ，之后考虑到施加固定约束和受力的圆孔部位相比其他部分受力情况更复杂，需要对其进行网格细化，以获得更好的等效应力计算结果，提高拓扑优化的精确性，三种网格划分方案的整体网格图如图 3 所示。

从图中可以看出，自由网格划分的网格单元和节点数量都很多，网格过渡不均匀，畸形网格单元占比大。扫略网格划分的网格节点数量较少且分布均匀，网格整体过渡均匀。多区域混合网格可以对模型的不同部位采用不同的网格单元，此例中，因为模型简单，对模型进行剖分后，中间部分是规整的六面体单元，圆弧区域附近是由映射构成的六面体单元，与前两者相比，网格疏密均匀，并减少了网格的单

元数和节点数，有效提高了计算效率。

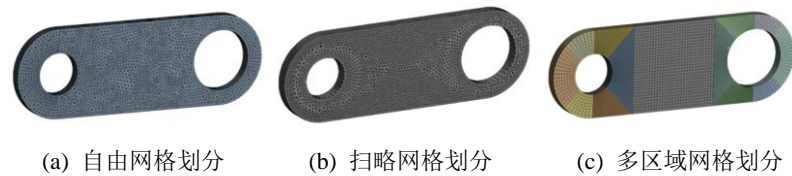


Figure 3. Overall diagram of multi area grid encryption processing
图 3. 多区域网格加密处理整体图

2.3. 网格质量

在完成有限元模型网格划分后，可以对网格进行质量检查，具体操作为 Mesh-Statistics-Mesh Metric-Element Quality。默认是 None，不做网格检查。常用的网格质量检查包括：Element Quality 和 Aspect ratio。

Element Quality 主要关注 Min、Max 和 Average，网格单元质量数值越大越好，平均质量一般不能低于 0.7，而 Aspect ratio 值一般大于 1，且数值越接近 1 越好。

由于网格划分方式不同，因此模型同一区域的网格节点数会存在差异，为了进行网格参数的比对，建立如表 1 所示的表格。

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. 标准试验系统结果数据

网格划分方式	网格参数			
	单元数	节点数	单元质量	纵横比
自动网格划分	63235	95901	0.8225	1.8932
扫略网格划分	18060	56208	0.96483	1.8208
多区域网格划分	12184	63255	0.88038	1.6696

经过数据对比后发现，网格划分方式会造成网格参数有较大差异。三种方案中网格质量最好的是扫略网格划分，多区域网格划分居中、自动网格划分最差。其中多区域网格划分的单元质量为 0.88038，也处于一个较好的水准。若不考虑计算机 CPU 配置和计算时间等因素，仅仅追求网格质量，扫略网格划分是最合适的方案。从网格参数的综合指标来看，多区域网格划分的计算成本最低，是应对此类模型最合适的方案。目前，为了提高有限元分析的计算效率和网格质量，在进行网格划分时，通常会对模型采用不同划分方式，使网格综合参数取得最好的结果，为之后的研究工作做好铺垫。

3. 静力学分析

3.1. 施加载荷和约束

对模型施加载荷约束时，主要考虑两方面，一方面是施加载荷约束的类型，另一方面是选择施加载荷约束的位置。在有限元分析过程中，使用不同的网格划分方式所得到的网格单元与网格质量不同，从而会对有限元分析的结果产生影响。

(1) 如果载荷为施加在面上的切削力时，载荷类型选择为 Force (集中力)；如果此集中力等效为面上的压强，则载荷类型选择为 Pressure (压强)。

ANSYS Workbench 中,可以对点、线、面施加集中力。集中力会均匀分散到所有的实体中,也能以矢量或者分量的形式进行定义。

(2) 如果要限制模型部分区域的所有自由度,并施加全约束,应选择约束类型为 Fix Support (固定约束);若要防止模型进行转动或是滑移,则选择约束类型为 Displacement (位移约束) [9]。

本例中对左端大孔(Surface A)施加固定约束,对右端小孔(Surface B)施加沿矢量 Y 轴正向,大小为 1000 N 的力,连接板的受力图如图 4 所示,其中绿色部分为可优化区域。

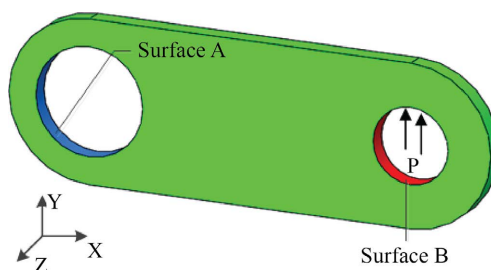


Figure 4. Connecting plate stress diagram

图 4. 连接板受力图

3.2. 等效应力求解

对连接板有限元模型施加载荷及其相关约束后,经过 ANSYS 后处理中的“Von Mises Stress”运算求解后,得到等效应力,等效应力遵循“形状改变比能理论”。根据等效应力数值能判断出对模型施加载荷约束条件后,各区域受力分布情况。自动网格划分下的最大应力值为 100.04 MPa,最大弹性应变值为 5.0251×10^{-4} ,扫略网格划分下的最大应力值为 101.53 MPa,最大弹性应变值为 5.08×10^{-4} ,多区域网格划分下的最大应力值 102.15 MPa,最大弹性应变值为 5.108×10^{-4} ,等效应变云图和弹性应变云图如图 5 所示。

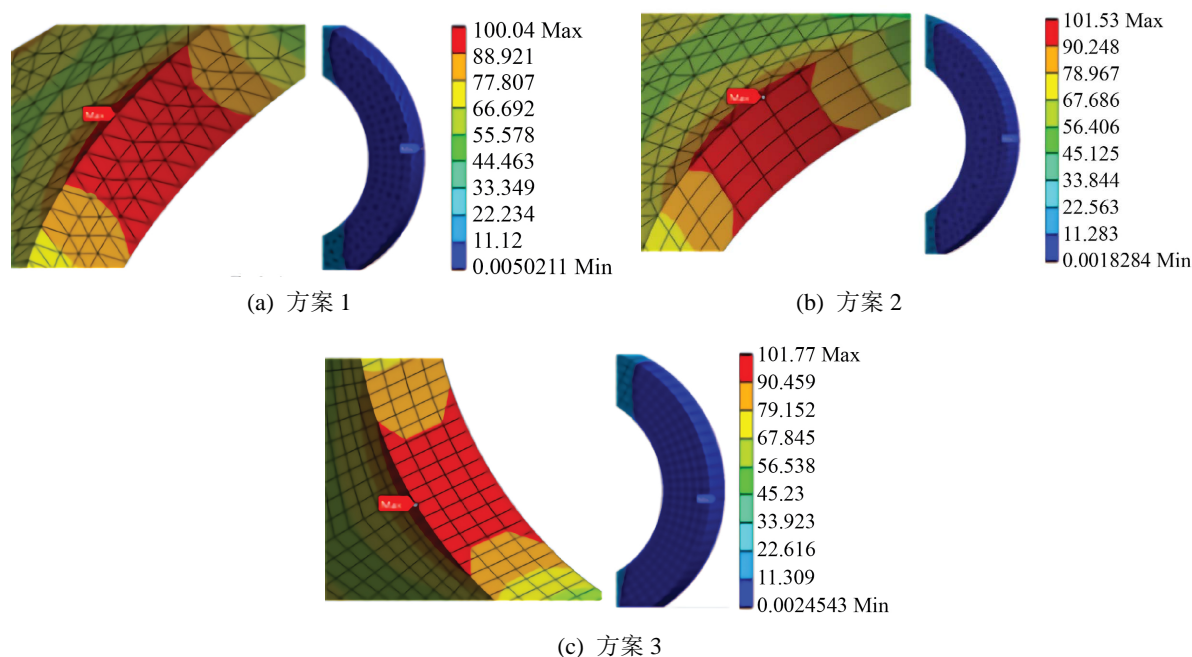


Figure 5. Comparison of maximum/minimum stress of three schemes

图 5. 三种方案的最大/最小应力比较

等效应力是根据压力场的作用进行计算的,对金属零件的静态结构进行分析,能预测在设定条件下零件各部位的等效变化情况,得到最大应力大致集中于连接板大孔的内表面处,而圆弧外表面受到的应力很小,可见这部分区域的材料是多余的,在满足使用要求的前提下,可以去除,三种方案的整体应力图如图6所示。

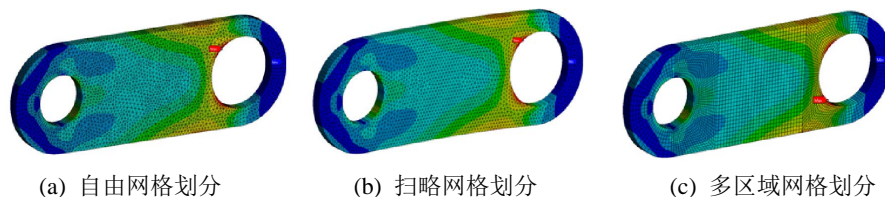


Figure 6. Overall stress distribution map

图6. 整体应力分布图

三种方案的整体应力分布图大致相同,但由于网格划分方案的不同,造成节点的位置和数目存在差异,导致应力的数值以及分布情况存在差异。根据应力应变情况分析得到,连接板圆弧部分所受应力较小,存在优化空间,可以去除该部位部分材料。

4. 拓扑优化及结果

本文采用变密度法的拓扑优化设计,其实质是通过去除传力路径中不通过或是受力较小的结构单元来达到减少材料的目的,从而找到最优的材料分布,并通过形状优化进一步改善结构性能[10]。在节约材料方面,结构拓扑优化比尺寸优化和形状优化更加优秀。

结构拓扑优化主要分为两类[11]:一类是离散结构的拓扑优化,主要用来分析并确定离散化的模型中,各个独立要素之间的连接形式与连接关系,并判断各要素存在的必要性;第二类是连续体结构的拓扑优化,大多数用来分析并确定均质连续体模型的空间构型,包括模型的整体形状、模型上孔洞的形状与位置等。

4.1. 拓扑优化的参数设置

由静力学分析结果可知,该零件结构存在着一定的优化空间。将模型零件导入 ANSYS Workbench 的 Topology Optimization 模块中,建立拓扑优化模型,设定保留 70%的材料,利用拓扑优化的变密度法去除多余材料,优化零件结构,减轻零件重量,以达到轻量化的目的。在设置好拓扑优化参数之后,进行分析计算,将等效应力引入 Convergence 中,三种方案均在在迭代 18 次后,设计区域达到了约束要求,在迭代 20 次时,计算停止,均判定为有限元收敛。

三种不同方案对零件模型的优化结果如图7所示,在设置保留 70%材料的条件下,结合静力学分析的结果,图中红色区域为可以去除的部分,灰色为保留的部分。



Figure 7. Topology optimization analysis cloud map

图7. 拓扑优化分析云图

对比三种方案发现, 由于连接板孔洞的部分网格较为复杂, 使采用四面体单元的方案 1 得到的拓扑优化结果, 在圆弧区域过渡不平滑, 零件边缘出现明显的锯齿。而采用了退化的六面体单元(五面体单元)的方案 2, 圆弧区域的过渡网格较方案 1 有较大的改善, 同时网格综合参数和质量也优于方案 1。最后, 采用多区域混合网格的方案 3 得到的网格, 在圆弧区域的过渡情况最好, 网格质量也较高。如果考虑计算时间与成本, 方案 3 同时也是三个方案中计算效率最高的。

4.2. 连接板模型调整

拓扑优化的结果大多数不能直接应用在实际中, 还需要根据实际的工程情况进行修正。因此, 综合参考三种方案的拓扑优化结果, 利用 Solid Works 对圆孔长板进行重建, 考虑到最大应力的分布和变化情况, 使壁厚保持不变, 去除多余材料并进行圆角优化, 修整得到的模型如图 8、图 9 所示。

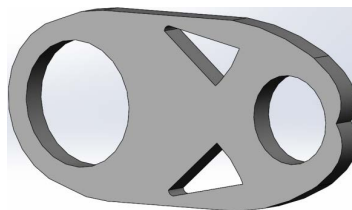


Figure 8. The characteristics of the keyhole part of the adjusted model

图 8. 调整后模型的小孔部分特征

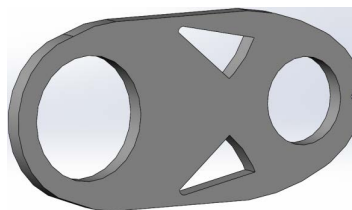


Figure 9. The characteristics of the large hole part of the adjusted model

图 9. 调整后模型的大孔部分特征

4.3. 优化结果前后对比

模型重建后, 将其导入 ANSYS Workbench 中, 并施加前文静力学分析中相同的载荷和约束条件, 进行有限元分析。

优化前模型的最大应力集中于大孔内表面附近, 优化后模型的最大应力集中于去除材料后近似为三角形区域的小角底部, 具体对比情况如表 2 所示:

Table 2. Comparison of connection plate before and after optimization

表 2. 连接板优化前后对比

序号	对比项	初始模型			优化后	
		方案	1	2		3
1	最大应力/Mpa		100.04	101.53	101.77	126.73
2	重量		5.6e-002	5.6e-002	5.6e-002	3.031e-002
3	减重比		0	0	0	45.9%

通过表 2 可以看出, 优化后的模型较优化前质量减轻了 45.9%, 部分材料去除后导致模型结构的稳定性有所下降, 模型最大应力值有所提升但在屈服强度的范围内, 不影响使用性能。

根据图 7 可以发现, 多区域网格划分的方案得到的结果更加接近重建后模型, 有助于优化模型的重建。

5. 结论

本文以双孔连接板为例, 使用三种不同的网格划分方式进行有限元分析, 根据最后拓扑优化的结果得出以下结论:

(1) 面对较为复杂的结构, 多区域混合网格划分能在不降低网格划分质量和模拟精度的前提下, 提高计算效率, 节约时间成本。

(2) 在拓扑优化后, 多区域混合网格划分能明显降低保留区域边缘的锯齿, 得到的结果最接近重建后的模型, 使模型的重建更为高效。

(3) 对优化后的模型进行静力学分析后, 分析结果表明模型质量下降明显, 且满足使用的性能要求, 实现了轻量化的设计初衷。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(2020114880011); 衢州市科学技术协会重点学术活动揭榜项目(2021ZDXM03); 衢州学院校级实验室开放项目(KFXM202103)。

参考文献

- [1] 李海峰, 吴冀川, 刘建波, 梁宇兵. 有限元网格剖分与网格质量判定指标[J]. 中国机械工程, 2012, 23(3): 368-377.
- [2] Shivanna, K.H., Tadepalli, S.C. and Grosland, N.M. (2010) Feature-Based Multiblock Finite Element Mesh Generation. *Computer-Aided Design*, **42**, 1108-1116. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2010.07.005>
- [3] Huang, L.L., Zhao, G.Q., Wang, Z.L. and Zhang, X.W. (2016) Adaptive Hexahedral Mesh Generation and Regeneration Using an Improved Grid-Based Method. *Advances in Engineering Software*, **102**, 49-70. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.09.004>
- [4] 占金青, 彭怡平, 龙良明, 刘敏. 基于应力约束的多相材料结构拓扑优化设计[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 149-155. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2021.01.013>
- [5] 古成中, 吴新跃. 有限元网格划分及发展趋势[J]. 计算机科学与探索, 2008, 2(3): 248-259.
- [6] 王家鋈, 敖勇, 邓志成. 汽轮机内缸有限元分析与网格划分方案优化[J]. 计算机辅助工程, 2020, 29(2): 34-38.
- [7] 王瑞, 高曙明, 吴海燕. 六面体网格生成和优化研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32(5): 693-708.
- [8] 许磊, 杜彦斌, 张磊. 基于拓扑分割的泵叶轮六面体网格划分方法[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 39-45.
- [9] 杨猛. CK61125 数控车床主轴箱的有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 洛阳: 河南科技大学, 2011.
- [10] Zhang, S.S., Li, H.M. and Huang, Y.C. (2020) An Improved Multi-Objective Topology Optimization Model Based on SIMP Method for Continuum Structures Including Self-Weight. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **63**, 2-4. (Prepublish). <https://doi.org/10.1007/s00158-020-02685-2>
- [11] 姚屏, 林源, 汤勇, 曾琴. 结构拓扑优化方法及其机器人轻量化应用现状及发展[J]. 机电工程技术, 2018, 47(11): 117-122.