

基于Inspire的山地自行车结构部件轻量化设计

徐文龙

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月24日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月30日

摘要

随着科学技术的发展,国民生活水平显著提高,山地自行车爱好者不仅对于自信车的强度有着极大要求,针对其质量的要求也有所提高,推动着轻量化技术的向前发展。企业通过轻量化设计可以降低成本,提高生产效率,同时保证产品质量,以提高企业竞争力。本文以山地自行车结构部件为研究对象,通过Altair Inspire拓扑优化软件对其进行拓扑优化设计。将结构部件模型导入Altair Inspire中,设置模型材料,添加载荷、约束,确定设计空间,选择形状控制,以优化模型的最大刚度为设计目标对其进行优化设计。通过有限元分析,进行拓扑优化后对比优化结果,将结果几何重构,在满足强度要求和可靠性的前提下,减少零部件质量56.83%,提高自行车的质量和使用效果。

关键词

山地自行车, 拓扑优化, 有限元分析, 几何重构, 轻量化

Lightweight Design of Mountain Bike Structural Components Based on Inspire

Wenlong Xu

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 24th, 2024; accepted: May 22nd, 2024; published: May 30th, 2024

Abstract

With the development of science and technology, the national living standard has been signifi-

cantly improved. The mountain bikers not only have great requirements for the strength of confident cars, but also improve their quality requirements, promoting the development of lightweight technology. Through lightweight design, enterprises can reduce costs, improve production efficiency, while ensuring product quality to improve their competitiveness. This paper studies the structural components of mountain bikes and designs their topology optimization by Altair Inspire topology optimization software. Import the structural component model into Altair Inspire, set the model material, add the load, the constraint, determine the design space, select the shape control, and optimize the maximum stiffness of the model. Through finite element analysis, after topology optimization, the results are compared to reconstruct the geometry, reduce the quality of parts by 56.83% while meeting the intensity requirements and reliability, and improve the quality and use effect of bicycles.

Keywords

Mountain Biking, Topology Optimization, Finite Element Analysis, Geometric Reconstruction, Lightweight

Copyright © 2024 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

对于热爱骑自行车的玩家来说自行车的结构和样式尤为重要。由于路面地势不平，山地自行车更加受到人民的青睐。车架的材料、构造以及设计样式对于制造一辆高性能、安全可靠的自行车是非常重要的，在减轻山地自行车重量便于操作的同时，还需要考虑自行车部件的受力情况。轻量化的目标是在给定的边界条件下，实现结构自重的最小化，同时满足一定的寿命和可靠性要求[1]。为了实现这个目标，需要选择适当的构造、轻质材料、连接技术、尽可能准确的设计以及可实现的制造工艺[2]。轻量化技术主要是通过对目标结构加以合理设计、优化相关功能、应用新型轻质材料等，提升目标性能，降低能耗，在运输领域更是能节约更多生产及运载成本[3] [4]。

目前，国内外不少学者开展了汽车、农用车的车架轻量化研究，提出了多种优化方法。赵韩等利用 ANSYS 软件对半挂车车架进行轻量化研究，质量最大降幅可达 25.5% [5]。吴伟斌等对轮式山地运输机车架进行轻量化设计，通过改变横梁结构及板厚，在满足功能的条件下质量减轻 12.4% [6]。也有文献利用尺寸优化方法对空投越野车、手扶电力驱动车、赛车及矿用车等的车架进行轻量化设计，设计后的车架质量均有大幅减轻[7]。

本文基于 Altair Inspire 软件根据原始自行车零部件拓扑优化进行再设计，首先设定自行车零部件材料，施加载荷分析强度。然后进行拓扑优化开展优化设计，考察不同目标质量下的优化结果及可行性，对比分析解读，为同种轻量化设计提供参考依据。

2. 自行车零部件约束与载荷

山地自行车结构部件来源于市场现有的自行车上，具体山地自行车支架结构图如下图 1 所示，部件根据实际的受力情况进行适当的简化调整，主要的载荷来自于减震器端和车架连接端，中间的孔为安装孔，使用约束来表征安装孔的固定情况。

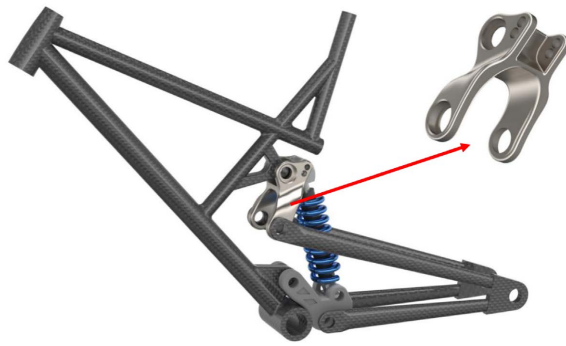


Figure 1. Structural diagram of a mountain bike bracket
图 1. 山地自行车支架结构图

支架所受中间孔约束如图 2 所示。

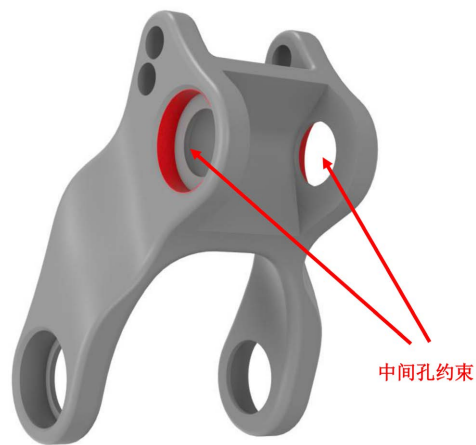


Figure 2. Intermediate hole constraint diagram
图 2. 中间孔约束图

零部件受力位置 1: X 正方向 100N, 位置 2: X 正方向 100N, 位置 3: Z 正方向 100N, 位置 4: Z 负方向 100N, 位置 5: Y 正方向 100N, 位置 6: Y 正方向 100N。如图 3 所示。

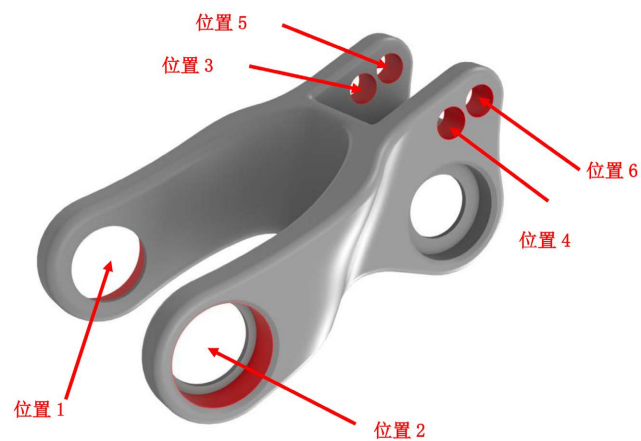


Figure 3. Force position diagram
图 3. 受力位置图

3. 初始强度分析

载荷及约束添加后，现通过 Inspire 运行 Opti Struct 分析自行车零部件模型的主应力、位移、安全系数、米塞斯应力，此次分析只考虑模型在静力状态下，所以无需对模态进行设置。其中设置接触方式为滑动接触，为确保模型分析数据的准确性，应采用二阶四面体网格单元，设置分析单元尺寸为 1.2 mm，计算速度/精度选择“更准确”，单一载荷工况分析。分析结果：最大米塞斯等效应力 11.51 MPa，最大位移 7.206×10^{-3} mm，最小安全系数 18.7，考虑到零部件是关于平面 XY 对称的结构，所以在进行拓扑优化时需要设定优化后的设计空间是关于平面 XY 对称的；由于零部件是通过铸造工艺加工成型的，在设定优化时分别设定单向拔模、双向拔模、挤出、三种方式进行优化，以比对优化结果。本次研究的最终目标为零部件的最大化刚度，优化后的设计空间的目标质量为初始质量的 25%，30%，35%，最小厚度为 3.6878 mm，最大厚度为 7.3756 mm。

4. 结果分析及方案确定

优化结果如表 1 所示，通过比对表中的优化结果不难发现，边界条件为单向拔模和双向拔模得到的优化结构、优化结果分析相同，优化结构在加工工艺方面两者没有差别；设置边界条件为拔模和设置为挤出得到的优化结构模型在质量、最大位移、最小安全系数、最大米塞斯应力等参数上都较为接近，但挤出的加工工艺比单向拔模、双向拔模的加工工艺要更加简单，便于加工生产。设计空间的目标质量为初始质量的 25%，其产生的最大位移相比其余两种方案相差较大，安全系数也较小，因此不考虑。设计空间的目标质量为初始质量的 30% 与 35%，最终优化的挤出方案质量相同，但目标质量为 35% 的最大位移以及最大米塞斯应力较小，最小安全系数较大。综上选用设计空间的目标质量为初始质量的 35%，形状控制为挤出作为本课题的优化方案。

Table 1. Optimize the result parameters

表 1. 优化结果参数

目标质量	形状控制	最大位移/mm	最小安全系数	最大米塞斯应力/MPa	质量/g
25%	单向拔模	1.617×10^{-2}	8.7	24.81	105.77
	双向拔模	1.609×10^{-2}	9.5	22.56	105.69
	挤出	1.963×10^{-2}	6.3	34.21	104.22
30%	单向拔模	1.351×10^{-2}	15.6	13.82	125.38
	双向拔模	1.348×10^{-2}	15.7	13.71	125.38
	挤出	1.591×10^{-2}	6.9	31.04	126.18
35%	单向拔模	1.180×10^{-2}	12.3	17.51	147.42
	双向拔模	1.348×10^{-2}	12.2	17.55	147.42
	挤出	1.328×10^{-2}	10.1	21.33	126.18

5. 几何重构

- 1) 使用拟合 PolyNURBS 工具对优化结果进行自动拟合，单元密度因子 2。
- 2) 通过拖拽控制点的方式调整自动拟合的优化结果，使其与非设计空间相交。

- 3) 使用布尔运算工具对优化重构结果和非设计空间进行几何相交,形成单一的实体三维模型。
- 4) 使用圆角工具处理重构结果与非设计空间之间的衔接,获得最终的轻量化设计结果。如图4所示。

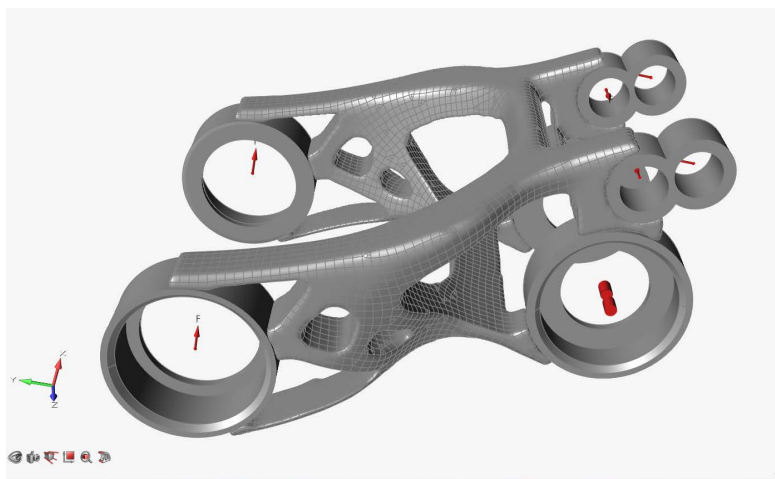


Figure 4. Geometric refactoring
图4. 几何重构

6. 强度校核

对山地自行车零件轻量化设计结果进行强度校核,将建立好的有限元模型提交 Opti Struct 求解器分析求解,分析自行车零部件模型的主应力、位移、安全系数、米塞斯应力,只考虑模型在静力状态下,无需对模态进行设置。接触方式为滑动接触,为确保模型分析数据的准确性,采用二阶四面体网格单元,设置分析单元尺寸为 2 mm,计算速度/精度选择更准确,单一载荷工况分析。分析结果:最大米塞斯等效应力 25.21 MPa,最大位移 1.545×10^{-2} mm,最小安全系数 8.5,最后优化结果强度经过校核不超过材料的屈服应力,满足实际的强度需求。

7. 结论

本文结合现有自行车零部件,根据所给的受力位置进行初始强度校核。分别设定单向拔模、双向拔模、挤出等三种方式进行优化,以比对优化结果。优化后的设计空间的目标质量分别设为初始质量的 25%, 30%, 35%, 最终选定形状控制设置为挤出目标质量为 35%的优化结构为最佳方案。山地自行车结构部件在优化前的重量为 496.376 g (材料 AISI304),通过轻量化设计之后的重量为 214.29 g,实现了 56.83%的减重。部件初始的强度分析结果,最大米塞斯等效应力 11.51 MPa,最大位移 7.206×10^{-3} mm,最小安全系数 18.7,轻量化设计之后的部件强度校核结果,最大米塞斯等效应力 25.21 Mpa,最大位移 1.545×10^{-2} mm,最小安全系数 8.5。强度不超过材料的屈服应力,满足实际的强度需求。

参考文献

- [1] 史继晨,朱焯,朱倩,邓巧云. 生活美学视角下轻量化设计在多肉植物包装中的应用[J]. 绿色包装, 2021(7): 78-81. <https://doi.org/10.19362/j.cnki.cn10-1400/tb.2021.07.015>
- [2] 徐利勇,黄海波,李超,裴家庆. 基于 CAE 技术的脚踏产品力学性能优化及轻量化的研究[J]. 中国自行车, 2020(6): 67-71.
- [3] 郭韦华. 轻量化技术在汽车工程中的应用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(3): 127-128.
- [4] 王军武,刘旭贺,王飞超,肖阳. 航空航天用高性能超轻镁锂合金[J]. 军民两用技术与产品, 2013(6): 21-24.

- [5] 黄林琪, 陈显扬, 陈韵律, 等. 基于 3D 打印的机械零件轻量化设计与制造[J]. 机电工程技术, 2021, 50(8): 96-100.
- [6] Solntsev, A., Zenchenko, V., Guliy, V., Chekanov, A. and Dzhabrailov, K. (2021) Automation of the Process of Modelling Sales Volume Dynamics of Light Weight Vehicles in the Russian Market, Using Customer Satisfaction as a Yardstick. *MATEC Web of Conferences*, **334**, Article No. 02023.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/202133402023>
- [7] 吴伟斌, 廖劲威, 洪添胜, 等. 山地果园轮式运输机车架结构分析与优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 9-47.