文章编号:1005-0523(2023)04-0086-07

基于Inspire的FSCC赛车悬架立柱优化设计及CAE分析

杜雨恒[1],贡哲蓉[2],罗秋雨[3],刘启洲[1],岳琪玻[1],肖 兵[1],彭必友[1],刘 俊[4],杨 杰[4],陈 刚[1]

(1. 西华大学材料科学与工程学院,四川 成都 610039; 2. 阿里云计算有限公司,浙江 杭州 310030; 3. 西华大学西华学院,四川 成都 610039; 4. 四川攀钢嘉德精工科技有限公司,四川 成都 610000)

摘要:零件轻量化是机械制造领域的重要研究方向。以中国大学生方程式汽车大赛BTR-X的悬架立柱作为例,在分析其实际受力情况的基础上,利用Altair inspire form软件以最大化刚度为目标对其进行了减重设计和拓扑结构优化。得到了带刹入弯工况条件下两种不同设计方案的应力、应变值及安全系数,并对比了其优缺点。结果表明,在最佳优化方案中,BTR-X悬架立柱最大有效应力为557.4 MPa,减重18.4%,提升了车辆的操稳性,实现了其轻量化的目标,对进一步提升FSCC赛车的性能有一定的参考价值。最后,通过选择性激光烧结成功实现了优化悬架立柱结构的3D打印成型,为FSCC赛车的轻量化设计及加工提供了新思路。

关键词:FSCC赛车;悬架立柱;Altair Inspire Form;拓扑优化;CAE分析

中图分类号:U214;TF142 **文献标志码**:A

本文引用格式:杜雨恒,贡哲蓉,罗秋雨,等. 基于Inspire的FSCC赛车悬架立柱优化设计及CAE分析[J]. 华东交通大学学报,2023,40(4):86-92.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.04.005

Optimal Design and CAE Analysis of FSCC Racing Suspension Column Based on Altair Inspire Form Software

Du Yuheng[1], Gong Zherong[2], Luo Qiuyu[3], Liu Qizhou[1], Yue Qibo[1], Xiao Bing[1], Peng Biyou[1], Liu Jun[4], Yang Jie[4], Chen Gang[1]

(1. School of Materials Science and Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Alibaba Cloud Computing Co., Ltd., Hangzhou 310030, China; 3. Xihua College, Xihua University, Chengdu 610039, China; 4. Panzhihua Iron and Steel Research Institute, Chengdu 610000, China)

Abstract: The practice of lightweight parts is an important research direction in the field of mechanical manufacturing. In this study, the suspension column of the Formula Student Combustion China (FSCC) BTR-X was taken as an example. Based on the analysis of its actual force, the Altair inspire form software was employed to perform weight reduction design and topology optimization with the goal of maximizing stiffness. The stress, strain values and safety factors of two different design schemes were obtained under the condition of entering the bend with brakes, and then their advantages and disadvantages were compared. In the best optimization scheme obtained, the maximum effective stress of the BTR-X suspension column was 557.4 MPa, and the weight was reduced by 18.4%, thus improving the stability of the vehicle. Accordingly, the lightweight goal was achieved, which has certain reference value for further improving the performance of FSCC racing cars. Finally, the 3D

收稿日期:2022-12-12

基金项目:四川省科技厅重点研发项目(2022YFG0366);四川省粉末冶金工程技术研究中心项目(SC-FMYJ2021-06)

printing molding process of the optimized suspension column structure has been successfully realized by selective laser sintering (SLS), providing a new route for the lightweight design and processing of FSCC racing cars.

Key words: FSCC racing; suspension column; Altair Inspire Form; topology optimization; CAE analysis

Citation format: DU Y H, GONG Z R, LUO Q Y, et al. Optimal design and CAE analysis of FSCC racing suspension column based on altair inspire form software[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(4): 86-92.

中国大学生方程式汽车大赛（formula student combustion china, FSCC）是中国汽车行业水平最高的大学生赛事，旨在培养具有优异创新设计能力、模拟仿真能力及实践动手能力的综合性人才,促进中国制造向中国创造转型[1-2]。悬架立柱用于连接车架与车轮,其作用是把作用在车轮上的各种力(如支撑力、驱动力、制动力等)及其力矩传递到车架上[3]。因此,悬架立柱的结构对赛车的驾驶操稳性有十分重要的影响。基于此,目前已有研究者从悬架结构形式选取、参数计算以及结构优化角度入手,提升悬架的结构和性能[4-8]。拓扑结构优化的原则是在不影响制件结构和刚度的前提下,重新设计结构的外形和几何形状，以获得最小成本或最小重量。如在汽车领域,研究人员使用拓扑结构优化方法对汽车底板结构进行重新设计,实现了减轻汽车总重量的目标。不仅提高了燃油效率,还有效降低了生产和维护成本。在航空领域,使用拓扑结构优化可获得更轻量化的飞机结构。如波音公司使用拓扑结构优化的方法重新设计了 777X 飞机的机翼结构,有效改善了机翼的空气动力学性能。实现零部件的轻量化设计对提升整个部件的贡献巨大[9]。

拓扑结构优化不仅在航空和汽车等领域已经得到了广泛的应用和研究,取得了重要的成果。同时,在 FSC 赛车领域,拓扑结构优化可以被用来重新设计底盘结构、车身外壳等部件,以实现更轻量化的设计和更好的性能。如 Jiang 等利用有限元法对 FSC 赛车车架的刚度和振动模态进行了分析,优化后的车架减重 7.18%[10]。关亮亮等首先利用 CATIA 对悬架立柱进行了三维建模,之后利用 ANSYS 对悬架立柱进行了静力学分析,发现前后立柱的最大应力均小于材料的屈服极限 455 MPa，安全系数为 3.3,满足使用需求[11]。Shi 等利用 MATLAB 设计了 FSC 赛车的转向梯形机制，减少了轮胎的磨损,保证了良好的转向能力和抓地力[12]。Yang 等计算了后轮轮毂在不同工况下的力学参数,结果表明优化设计后的后轮轮毂可减重约 20%[13]。Ye 等利用 Hypermesh 分析了汽车转弯时所需的承载构件扭转刚度,并优化了零部件的结构,发现模拟横向碰撞的最大变形为 14.57 mm,最大应力为 136 MPa,可保证驾驶员的安全[14]。

Altair Inspire Form 软件可用于子优化设计,并模拟制造工艺过程,引起了越来越多轻量化设计研究者的关注[15-18]。本文以第十届 FSCC 赛车 BTR-X 的悬架立柱作为研究对象,利用 CATIA 建立起三维模型，之后对赛车参数和悬架立柱受力进行了分析,得到符合实际的工况条件。在此基础上,采用 Altair Inspire Form 软件,以满足强度、刚度要求为设计目标，完成了悬架立柱的应力分析及优化重构,并实现其结构轻量化。

1　赛车主要参数

本文所用的 FSCC 赛车主要参数如表 1 所示。表中参数除轴距、轮距在设计与制造装配过程中能够较精确保证和控制之外，其余参数均为目标参数。

表 1　BTR-X 主要参数
Tab.1　Main parameters of BTR-X

Parameter	Value	Parameter	Value
Total mass	245 kg	Height	1 080 mm
Curb weight	180 kg	Front overhang	740 mm
Wheelbase	1 560 mm	Rear overhang	370 mm
Front track	1 160 mm	Front and rear axle load ratio	45:55
Rear track width	1 120 mm	Centroid height	280 mm
Length	2 700 mm	Minimum turning radius	3.3 m
Width	1 350 mm		

2 悬架立柱受力计算

在 FSCC 赛事中,为提高每圈的赛道成绩,赛道行驶设置很多弯,但在进弯前又不可把速度降到允许的最大弯速度附近,所以参赛选手会普遍用到带刹入弯[19]。带刹入弯也称为“循迹刹车”,带着刹车入弯,使赛车重心前移,前轮抓地力提升,最大限度地逼近最大转弯速度,到了急转弯处刚好减速到位,缩短过弯的时间。可见,带刹入弯是大学生方程式赛车中较为常见的一种车辆行驶工况,也是较为恶劣的一种工况。因此,本文选择的受力工况为带刹入弯,在此基础上分析前悬立柱的受力情况,如表 2 所示。

表 2 前悬零件受力及参数表

Tab.2 Forces and parameters of front suspension parts

Parameter	Value	Parameter	Value
F_x	1 455.3 N	F	2 524.9 N
F_z	1 787.9 N	Γ	2°
L_b	39 mm	L_0	50.8 mm
L_1	70.8 mm	L_2	70 mm
L_3	21 mm	R	225 mm
r_B	79.74 mm	r_{HBa}	50 mm
r_{BDa}	47.25 mm	F_y'	2 461.1 N
F_z'	1 874.9 N	F_B	4 106.4 N
α	4.5°	B	3°
F_y''	2 516.9 N	F_x''	1 453.3 N
L_4	11.6 mm	L_5	60.5 mm
L_6	70.6 mm	Δ	5.4°
ε	20°	ζ	3.6°

2.1 制动卡钳安装座受力计算

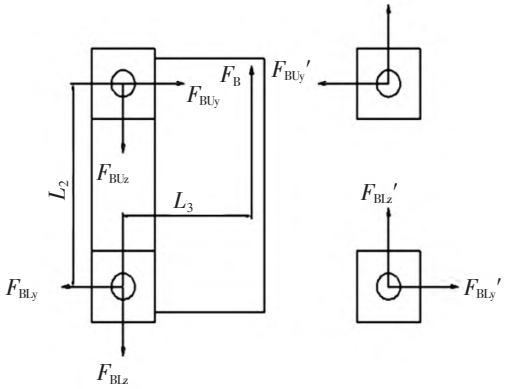


图 1 卡钳安装座受力简图

Fig.1 Force diagram of caliper mounting seat

图 1 为卡钳安装座受力简图,在冲击因数为 1 的情况下,由受力平衡可得

$$F_{BUz}+F_{BLz}=F_B$$

$$F_B\cdot L_3-F_{BUy}\cdot L_2=0$$

$$F_{BUz}'=F_{BLz}'=F_B/2=2\ 053.2\ \text{N}$$

$$F_{BUy}'=F_{BLy}'=(F_B\cdot L_3)/L_2=1\ 231.93\ \text{N}$$

2.2 轴承座受力计算

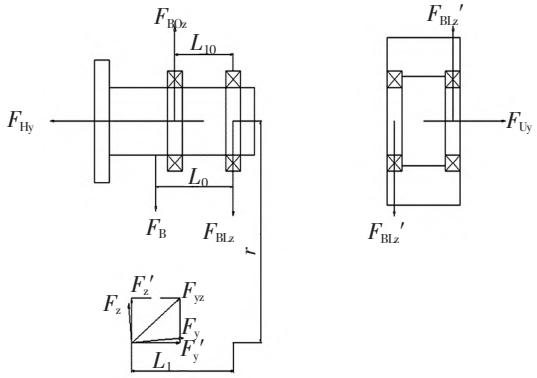


图 2 Z 轴方向上轴承座受力简图

Fig.2 Force diagram of the bearing housing along the Z-axis

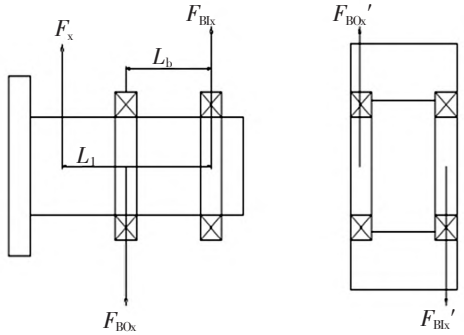


图 3 X 轴方向上轴承座受力简图

Fig.3 Force diagram of the bearing housing along the X-axis

图 2 和图 3 为轴承的受力简图,根据受力平衡条件计算可得

$$-F_z'\cdot L_1-F_{BOz}\cdot L_b+F_y'\cdot r+F_B\cdot L_0=0$$

$$F_{BOz}=F_{BOz}'=(F_y'\cdot r+F_B\cdot L_0-F_z'\cdot L_1)/L_b=16\ 143.3\ \text{N}$$

$$-F_x\cdot L_1+F_{BOx}\cdot L_b=0$$

$$F_{BOx}=F_{BOx}'=(F_x\cdot L_1)/L_b=2\ 624\ \text{N}$$

$$F_z'+F_{BOz}-F_B-F_{BLz}=0$$

$$F_{BLz}=F_{BLz}'=F_z'+F_{BOz}-F_B=13\ 912\ \text{N}$$

$$F_x+F_{BLx}-F_{BOx}=0$$

$$F_{BLx}=F_{BLx}'=F_{BOx}-F_x=1\ 186.7\ \text{N}$$

$$F_y'-F_{Hy}=0$$

$$F_{Hy}=F_{Uy}=F_y'=2\ 461.1\ \text{N}$$

3　悬架立柱优化

Altair Inspire 内部搭载了功能强大的 Altair OptiStruct 求解器,是一个经过工业验证的线性和非线性静力学及振动力学求解器,已广泛应用于工业结构设计及优化设计领域如基于应力、疲劳的优化等。一般来说优化设计主要包括优化目标、工况条件及约束条件 3 个要素,优化目标不同对应的数学模型也不同。利用 Altair Inspire 软件进行仿真驱动设计分为以下几个步骤:① 草绘或输入模型;② 简化零件;③ 设置相应的材料和载荷;④ 产生理想的形状;⑤ 确认性能;⑥ 将概念设计输出为 CAD 几何模型。拓扑结构优化的基本原理是基于有限元分析的最小势能原理,即对于一个特定的载荷和边界条件,通过在结构中去除不必要的材料,最大限度地减少其势能, 并使结构保持足够的刚度和强度。本研究以悬架立柱的静力学刚度最大化为目标,以设计空间体积分数为约束条件,其优化原理的数学语言如下[20]

$$\text{Find}X=\{x_1,x_2,x_3,\cdots,x_i\}^{\mathrm{T}}\in\Omega$$

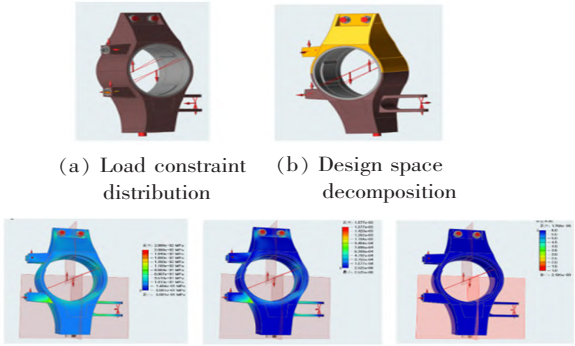
$$\min C(X)=\frac{1}{2}\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{U} \tag{1}$$

$$\text{s.t.}:\sum_{i=1}^{N}V(x_i)\leqslant V^*$$

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{K}\boldsymbol{U},0<x_{\min}\leqslant x_i\leqslant x_{\max}\leqslant 1,(i=1,2,\cdots,N) \tag{2}$$

式中:X 为设计变量,Ω 为设计变量的集合,C 为柔度,$\boldsymbol{U}$ 为结构位移,$\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵,$\boldsymbol{F}$ 为载荷矩阵,$V(x)$ 为体积约束函数,V^* 为体积限制分数值,i 为单元变量,$x_{\min}$ 为设计变量下限值,$x_{\max}$ 为设计变量上限值。

基于 Altair Inspire 的优化机理,本研究的悬架立柱优化原则和思路如下。① 降低主销偏移距:由于选用的赛车车轮的偏心距较小,因此在设计前立柱时,需尽量使上、下臂与立柱的铰接点在不与其他零件发生干涉的前提下尽量靠近车轮中心线,以减小转向主销偏移距和转向所需要的力矩; ② 采用轻质材料降低质量:选用钛合金,以减小立柱的整体质量;③ 由于几何空间干涉原因,在保证转向推杆安装位置的前提下,没有多余的空间安装支耳连接立柱和转向推杆,因此只对悬架立柱支耳和立柱体进行结构优化。



(a) Load constraint distribution　(b) Design space decomposition

(c) First principal stress　(d) First principal strain　(e) Safety factor

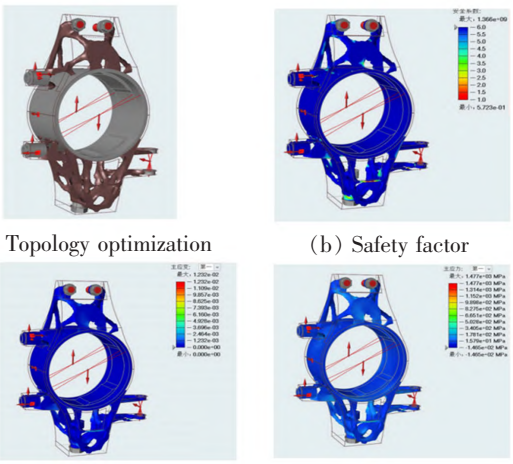
图 4　未优化前悬架立柱的有限元分析

Fig.4　Finite element analysis of unoptimized front suspension pillar

首先对未优化前的悬架立柱进行了 CAE 分析,如图 4 所示。按照前述受力计算结果,分别在相应位置施加载荷,如图 4(a)所示。由于悬架立柱上下两部分的受力情况与形状特征不同,所以将其分解成上下两部分,并采用不对称的方式,如图 4(b)所示。设置其分析网格尺寸大小为 1.5 mm, 并选用 TC4 钛合金材料,其杨氏模量为 116.5 GPa,屈服强度 1 029 MPa。利用 Inspire 软件得到有限元模拟结果,如图 4(c)~图 4(e)所示。前立柱的最大应力值为 210 MPa,最大应变值为 0.002,但考虑到进一步提升整个 FSC 赛车的性能,需对悬架立柱进行拓扑结构优化,以期达到减重的目的。

在 Inspire 的优化模块中选择拓扑优化,以支架的刚度最大化为设计目标,以设计空间的总体积为设计变量,以无频率约束、最小厚度为 4.5 mm、滑动接触为约束条件,质量目标为设计空间的 20%。在 Inspire 软件中,厚度约束指的是优化后结构的最小厚度,其值越小优化精度越高,但所需时间也越久。此外, 厚度约束值与后台的网格数量密切相关,厚度约束值越小则后台生成的网格数量也越多。Inspire 软件默认后台网格尺寸大小为厚度约束的 1/3。在得到优化结果后,对该结果进行了分析验证,如图 5 所示。由结果可知,轻量化后的悬架立柱具有典型的拓扑结构, 其主应力最大为 1 477 MPa,最小安全系数为 0.572 3。

对方案一的优化结构进行了包覆处理, 采用 Inspire 自带的 PolyNURBS 模块进行建模,结合多边形建模的简便性与 NURBS 的精度和灵活性, 对方案一的结构进行重构。根据方案一的仿真优化参



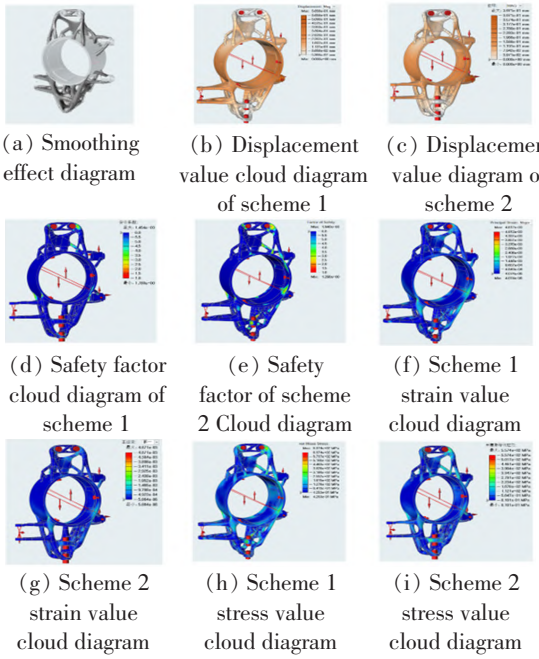
(a) Topology optimization (b) Safety factor

(c) First principal strain (d) First principal stress

图 5 方案一优化结果及其 CAE 分析

Fig.5 Optimization results of scheme 1 and its CAE analysis

数,进行局部优化得到了方案二,并将两种方案的位移值、安全系数、第一主应力进行对比,结果如图6 所示。方案一最大位移量为 0.57 mm,而方案二最大仅为 0.40 mm,有效抑制了 29.8%的变形。由主应变云图得方案一的最大主应变为 0.004 81, 方案二为 0.004 87,最大主应变差别不大。由应力值变云图得方案一的最大应力为 637.4 MPa, 方案二为 557.4 MPa,表明经过局部结构调整,有效降低了悬



(a) Smoothing effect diagram (b) Displacement value cloud diagram of scheme 1 (c) Displacement value diagram of scheme 2

(d) Safety factor cloud diagram of scheme 1 (e) Safety factor of scheme 2 Cloud diagram (f) Scheme 1 strain value cloud diagram

(g) Scheme 2 strain value cloud diagram (h) Scheme 1 stress value cloud diagram (i) Scheme 2 stress value cloud diagram

图6 方案一和方案二优化结果分析

Fig.6 Analysis of optimization results of scheme 1 and scheme 2

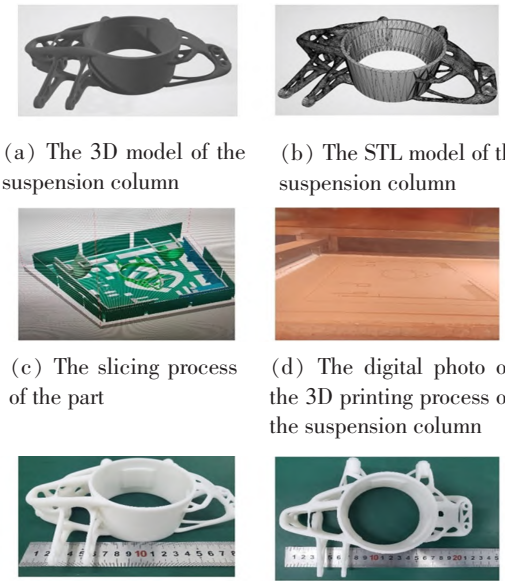
架立柱的应力值,提高了结构的稳定性。悬架立柱选用的材料为 TC4 钛合金,其屈服极限为 1 029 MPa,经过结构优化后的等效应力值小于材料的屈服强度,保证了悬架立柱的使用安全性。对悬架立柱的两种结构优化方案进行了静力学强度分析校核,安全系数 n 用如下公式进行表示

$$n=\frac{\sigma_s}{\sigma_{\max}}=n_s \tag{3}$$

式中:σ_s 为材料屈服强度,$\sigma_{\max}$ 为最大应力值,n_s 为安全系数。一般来说对于钛合金,其最小安全系数为 2.8。对比两种方案,大部分区域的安全系数均大于 3,表明两种优化方案基本安全。但部分区域的安全系数较小, 需在使用过程中监测其疲劳状态,如方案一和方案二的最小安全系数分别为 1.29,1.78。

4 悬架立柱的 3D 打印加工

采用选择性激光烧结 3D 打印对优化后的悬架立柱进行了加工成型,如图 7 所示。图 7(a)为悬架立柱的三维模型,其相应的 STL 模型如图 7(b)所示。图 7(c)为打印制件的切片过程,将原始的悬架立柱的三维模型离散成多个二维平面,其切片参数如下:烧结温度为 159 ℃,预热温度 140 ℃,扫描间距 0.3 mm,扫描速度为 2.7 m/s,打印层厚为 0.1 mm。选用华曙高科的 HS403P 设备进行 3D 打印加工,材料选用尼龙



(a) The 3D model of the suspension column (b) The STL model of the suspension column

(c) The slicing process of the part (d) The digital photo of the 3D printing process of the suspension column

(e) Front view of the printed part (f) Top view of the suspension column

图7 优化悬架立柱的 3D 打印加工

Fig.7 Optimizing the 3D printing process of the suspension column

12,其烧结过程图片如图 7(d)所示,可以看到整个打印过程稳定,成型缸中无翘曲现象,这归因于尼龙 12 良好的烧结性能。经过 3D 打印的低维构建、层层叠加,最终得到了优化后的悬架立柱实物,如图 7(e)和图 7(f),可以看到打印制件形状保持较好且外观规整,可为其最终的成型提供模型参考。需注意的是在本文中所使用的尼龙 12 屈服强度仅为 45 MPa,难以满足悬架立柱的实际使用工况, 因此若考虑实际使用还需使用金属 3D 打印技术如激光选取熔化等。

5　结论

本文以 FSCC 赛车 BTR-X 的悬架立柱作为研究对象,利用 Altair Inspire Form 对原模型结构进行拓扑优化设计及数值模拟分析,对比了两种优化设计方案, 并根据最优方案对零件模型进行重构,结论如下。

1) 优化后的零件相较于悬架立柱传统切削加工方案,零件的安全系数、最大应力值、最大应变值均得到了改善。重构后的零件总重为 473 g,比传统切削加工方案降低了 106.7 g, 减重比达 18.4%,实现了悬架立柱轻量化的目标。此外,在各项设计参数均达标的前提下,减轻了簧下质量,提升了车辆的操稳性。

2) 本文选用打印精度较高的选择性激光烧结技术,以尼龙 12 为打印材料,成功地打印出了优化后的悬架立柱,为赛车的轻量化设计及加工提供了参考。

参考文献:

[1] 王淑旺,夏麒翔,罗建辉. 大学生方程式赛车电子差速控制策略研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(3):289-293.
WANG S W,XIA Q X,LUO J H. Research on electronic differential control strategy of Formula Student racing car [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science Edition),2022,45(3):289-293.

[2] 张瑞乾. 关于大学生方程式赛车车队的组织与管理的探讨[J]. 教育教学论坛,2019(22):7-8.
ZHANG R Q. Discussion on the organization and management of Formula Student racing team[J]. Education and Teaching Forum,2019(22):7-8.

[3] 王世权,任豪放. 大学生方程式赛车整车优化设计[J]. 科技与创新,2020(16):44-46.
WANG S Q,REN H F. Vehicle optimization design of Formula Student racing car[J]. Technology and Innovation, 2020(16):44-46.

[4] 刘明,朱瑞峰,乔晓亮. 基于 ANSYS 的 FSAE 赛车仿真分析[J]. 应用科技,2021,48(2):87-94.
LIU M,ZHU R F,QIAO X L. Simulation analysis of FSAE racing car based on ANSYS[J]. Applied Science and Technology,2021,48(2):87-94.

[5] 张璇,韩忠浩,曾飞云,等. FSC 赛车空气动力学套件的设计与分析[J]. 辽宁工业大学学报:自然科学版,2015,35(5):308-312.
ZHANG X,HAN Z H,ZENG F Y,et al. Design and analysis of FSC racing aerodynamic kit[J]. Journal of Liaoning University of Technology:Natural Science Edition,2015,35(5):308-312.

[6] 阎力,史青录,连晋毅. FSC 赛车车架的静态结构与模态分析[J]. 太原科技大学学报,2017,38(2):98-103.
YAN L,SHI Q L,LIAN J Y. Static structure and modal analysis of FSC racing car frame[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology,2017,38(2):98-103.

[7] 马芳武,陈实现,赵花垒,等. 强度,刚度与模态约束下的 FSC 赛车车架轻量化[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(4):18-25.
MA F W,CHEN S X,ZHAO H L,et al. Lightweight FSC racing frame under strength,stiffness and modal constraints [J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition),2018,45(4):18-25.

[8] 唐亦鹏,张嘉杰,刘新田,等. FSC 赛车踏板总成设计与改进[J]. 上海工程技术大学学报,2019,33(3):256-261.
TANG Y P,ZHANG J J,LIU X T,et al. Design and improvement of FSC racing pedal assembly[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Technology,2019,33(3):256-261.

[9] 胡国良,吴礼繁. 磁流变制动器结构设计研究现状分析[J]. 华东交通大学学报,2020,37(5):1-8.
HU G L,WU L F. Analysis on the research status of mag netorheological brake structure design[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):1-8.

[10] JIANG L,WANG G,GONG G,et al. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress,November 27-29, 2012[C]. Beijing:Springer,2013.

[11] 关亮亮,王本善,王思朋,等. 小型赛车悬架立柱有限元分析[J]. 汽车实用技术,2019(17):47-48.
GUAN L L,WANG B S,WANG S M,et al. Finite element analysis of suspension column of small racing car[J]. Automotive Practical Technology,2019(17):47-48.

[12] SHI C Z,SHI Z X,WANG T T. Design of steering trapezoidal mechanism for FSC racing base on matlab [J]. Advanced Materials Research,2013(647):885-890.

[13] YANG Y,YANG S,ZHAI Y. Proceedings of the 2022 5th International Conference on Intelligent Robotics and Control Engineering(IRCE),September 23-25,2022[C]. Tianjin:IEEE,2022.

[14] YE P,ZHOU W,ZHAO C. Design and lightweight based on FSC racing monocoque[J]. Journal of Physics Conference Series,2021,1885(5):052031.

[15] SRINIVAS G L,JAVED A. A novel method to synthesize a single topology for dynamically loaded members[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2021,35 (4):1549-1557.

[16] 罗勇,杜平,朱丽君,等. 基于 Inspire 软件的拓扑优化设计案例分析[J]. 制造技术与机床,2021(11):31-34.
LUO Y,DU P,ZHU L J,et al. Case analysis of topology optimization design based on inspire software[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools,2021(11):31-34.

[17] 唐锋,熊建武,胡智清,等. 摩托车金属连接件 ABS 轻量化设计与 FDM 增材制造[J]. 工程塑料应用,2022,50(3):86-90.
TANG F,XIONG J W,HU Z Q,et al. ABS lightweight design and FDM additive manufacturing of motorcycle metal connectors[J]. Engineering Plastics Application,2022,50(3):86-90.

[18] 赵阳,陈敏超,王震. 面向增材制造的索杆结构节点拓扑优化设计[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):58-68.
ZHAO Y,CHEN M C,WANG Z. Topology optimization design of cable-strut structure nodes for additive manufacturing[J]. Journal of Building Structures,2019,40(3):58-68.

[19] 冯红晶. 基于 Cruise 的电动车整车性能参数匹配及仿真分析[J]. 西华大学学报(自然科学版),2017,36(3):16-22.
FENG H J. Performance parameter matching and simulation analysis of electric vehicle based on Cruise[J]. Journal of Xihua University(Natural Science Edition),2017,36(3):16-22.

[20] 周冉,沈嵘枫,谢诗妍,等. 以 Altair inspire 对育苗成型机纵封部支架的拓扑优化[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2020,32(2):71-73.
ZHOU R,SHEN R F,XIE S Y,et al. Topology optimization of vertical sealing part support of seedling forming machine with Altair inspire[J]. Journal of Henan Institute of Engineering(Natural Science Edition),2020,32(2):71-73.

第一作者:杜雨恒(1995—),男,硕士研究生,研究方向为增材制造及智能装备。E-mail:497073327@qq.com。

通信作者:陈刚(1991—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为增材制造及 CAE 仿真模拟。E-mail: gangchen@mail.xhu.edu.cn。

(责任编辑:熊玲玲)