

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.10.014

基于 SIMP 变密度法的结构拓扑优化及应用

于海, 杨慧斌, 茅健, 闫娟

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 在结构拓扑优化过程中, 为了解决复杂结构计算速度慢、效率低的问题, 提出了一种基于固体各向同性材料密度惩罚模型(SIMP)的步长自适应优化算法, 该算法可根据 SIMP 惩罚因子 P 值自适应选择佳步长移动参数, 并根据得到的目标函数的迭代值, 自适应改变每次迭代的移动步长, 在保证迭代精度的同时, 以更快的速度逼近迭代目标, 并利用经典 MBB 简支梁算例进行仿真实验, 通过划分不同网格数量, 横向对比分析另外三种步长迭代公式, 得出最终迭代结果准确且迭代速度最快可提高 100% 的结论。此外, 为满足汽车领域的轻量化需求, 用拓扑优化技术, 针对汽车油门支架结构进行重新优化设计, 使优化后的模型体积减小 35%; 在此基础上, 利用增材制造技术, 采用双喷头连续纤维打印机, 以长碳纤维体积分数为 35% 的复合材料(基体为短切碳纤维填充尼龙丝材)替代传统的铝合金材料进行增材制造, 实现减重的目的, 最终得到力学性能与原结构相当、质量减轻 48% 的油门支架结构, 可进一步实现汽车的轻量化制造。

关键词: 变密度法; 自适应移动步长; 拓扑优化; 油门支架结构; 增材制造

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)10-0091-09

Structural topology optimization based on SIMP variable density method and its application

YU Hai, YANG Huibin, MAO Jian, YAN Juan

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract : In the process of topology optimization, in order to solve the problems of slow computation speed and low efficiency in complex structures, a step-size adaptive optimization algorithm based on the solid isotropic material with penalization (SIMP) model was presented. The proposed algorithm adaptively selects the optimal step size parameter according to the SIMP penalty factor P value and adjusts the step size for each iteration based on the objective function's iterative value. This approach ensures precision while accelerating convergence to the iteration target. Simulation experiments using the classical MBB simply supported beam case, with various mesh sizes, demonstrate that the proposed method achieves the most accurate results with up to a 100% improvement in iteration speed compared to three other step-size iteration formulas. Additionally, to address the lightweight requirements in the automotive industry, topology optimization was applied to redesign the throttle bracket structure. The optimized model volume is reduced by 35%. On this basis, using the additive manufacturing technology, the double-nozzle continuous fiber printer was used. The composite material with a long carbon fiber volume fraction of 35% (the matrix is a chopped carbon fiber filled nylon wire) replaced the traditional aluminum alloy material for additive manufacturing to achieve the purpose of weight reduction. Finally, the throttle bracket structure with mechanical properties equivalent to the original structure and a weight reduction of 48% were obtained, which can further realize the lightweight manufacturing of automobiles.

Keywords : variable density method ; adaptive mobile step length ; topology optimization ; throttle bracket structure ; additive manufacturing

拓扑优化是一种能够有效提高机构结构性能的方法, 在实现轻量化、高强度和高性能上起到了

关键的作用, 其主要原理是在给定材料品质和设计域内, 通过优化设计方法可得到满足约束条件又使

通信作者: 杨慧斌, 硕士, 实验师, 研究方向为机械制造及自动化、运动控制、智能控制等

收稿日期: 2024-09-04

引用格式: 于海, 杨慧斌, 茅健, 等. 基于 SIMP 变密度法的结构拓扑优化及应用[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(10):91-99.

YU Hai, YANG Huibin, MAO Jian, et al. Structural topology optimization based on SIMP variable density method and its application[J].

Engineering Plastics Application, 2024, 52(10):91-99.

目标函数最优的结构布局形式及构件尺寸^[1],自Bendsøe和Kikuchi提出了拓扑优化均匀化方法^[2],各种拓扑优化思路及方法不断被提出,如变密度法、变厚度法等^[2]。目前在航空航天^[3]、汽车^[4]、无人机^[5]等领域都得到了广泛的应用。

Lin等^[6]提出了一种约束体积的自适应算法,可以让体积约束能够根据强度等条件进行改变,解决了强度和刚度优化的问题。匡兵等^[7]通过调节基于固体各向同性材料密度惩罚模型(SIMP)中灵敏度的方式减少灰度单元,有效减少了数值不稳定的现象。廉睿超等^[8]提出考虑分区混合权重的敏度过滤方法来得到边界清晰的拓扑优化结构,使得拓扑优化结果能够显现出更加清晰的边界结构。然而拓扑优化虽然能够得到较为巧妙的结构,但某些结构难以用传统制造技术完成快速制造,而增材制造技术完美地解决了这个问题,实现了一体化设计制造^[9]。该技术也称3D打印技术,核心概念是由面成体地去构建三维物体,即通过挤、铺设等形式构成平面,然后层层堆叠从而生成三维实体,与传统制造技术不同,该技术无须削减或去除材料。由于其独特的特性和优势,增材制造技术在各个行业和领域均有着广阔的发展空间^[10]。

然而,对于增材制造技术而言,除了工艺,材料的选择是影响其打印零件成品材质性能和应用领域的重要因素,纤维复合材料作为新材料,不同的纤维类型、打印参数、铺设路径会显著影响到其力学性能。其中,碳纤维复合材料的力学性能表现优异,近年来得到了广泛的关注^[11],熊婷等^[12]研究了成型方向、纤维分布和成型路径方式对于连续纤维复合材料力学性能的影响,得到了平放打印、纤维层间均匀分布和0°成型路径的打印参数,并对比不同连续纤维体积分数打印的力学性能,证明体积分数35%的连续纤维可在较低成本下提高样件力学性能。

随着汽车领域的不断发展,汽车结构的轻量化需求不断提高,研究人员对于汽车各个零部件的轻量化进行了深入研究^[13],吴方贺^[14]利用碳纤维复合材料对汽车发动机罩的结构进行设计和优化,优化后整体质量减轻了18%。田凯^[15]对汽车保险杠防撞梁进行轻量化设计,减重达到了64.5%,且结构满足防撞刚度要求,证明了碳纤维复合材料可替代钢制防撞梁的结论。油门支架是控制汽车发动机转速

和输出功率以及行驶速度和动力大小的重要部件,汽车行驶过程中,需要驾驶员不断踩踏控制油门支架的开度,保证汽车正常行驶,因此油门支架结构的安全和稳定对于汽车行驶和乘客的安全、舒适性有着重要的影响。

笔者提出了一种基于SIMP适用于多网格划分情况下的自适应步长的拓扑优化方法,可以在不影响优化效果的前提下,提高迭代效率,减少拓扑优化迭代时间。并针对油门支架结构的极限工况进行有限元分析和拓扑优化,利用碳纤维复合材料,基于增材制造技术制造,为汽车结构的轻量化提供应用实例。

1 SIMP变密度法优化模型

变密度法通过将优化区域内任意点定义为不同材料密度或空隙,从而实现拓扑结构的优化。基本思路是将待优化零件的材料密度分布看作多维数据,即定义一个在0~1内取值的相对密度 μ ,将优化目标看作是用 μ 表示的函数,然后采用算法进行数据处理,使各个单元密度无限趋向于0或1,从而生成最后结构。

变密度法通过引入中间密度,将非0即1的离散问题转化成在 $[0, 1]$ 区间的连续问题,然而计算结果中存在的中间密度无法在实际中存在,因此,要尽量减少非0和1的中间密度值,使其向0和1两边靠拢。由此,需要对中间密度值进行惩罚,主要有SIMP和材料属性的理性近似模型(RAMP)两种材料插值模型,其中基于SIMP格式的插值模型见式(1)。

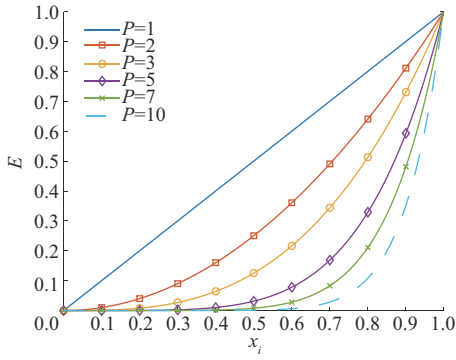
$$E_{(x_i)} = E_{\min} + (x_i)^P (E_0 - E_{\min}), x_i \in [0, 1] \quad (1)$$

式中: x_i 为各个单元的相对密度值,当 x_i 取0或1时,分别代表该单元无或有材料; $E_{\min}$ 为当 x_i 取0时,无材料单元的弹性模量; E_0 表示当 x_i 取1时,有材料单元的弹性模量; $E_{(x_i)}$ 表示插值后所求的单元 i 的弹性模量; P 为惩罚因子,通常取值在 $[2, 4]$ 之间。

$E_{\min}$ 理论上应取0,为了防止奇异矩阵的出现,通常给予其一个最小值 $0.001E_0$,因此式(1)可近似看作为式(2)。

$$E_{(x_i)} = (x_i)^P E_0, x_i \in [0, 1] \quad (2)$$

为直观地展示SIMP中惩罚因子 P 与相对密度 x_i 和相对弹性模量 E 之间的关系,现扩大 P 的取值范围至 $[1, 10]$ 并于图1中展示。由图1可以看出,惩罚因子 P 的值越大,惩罚后的弹性模量 E 向0和1聚集越快,从而使得模型能够更快速逼近所期望的拓

图1 SIMP密度惩罚中 P 对惩罚函数的影响Fig. 1 Influence of P on penalty function in SIMP density penalty

扑优化模型,然而, P 并非越大越好。当 P 取值较小时,惩罚力度不够,可能会出现大量的灰度单元;当 P 取值过大时,灵敏度为0的相对密度值同样较大,会导致迭代过程中大量单元被过早删除,从而使得收敛速度变慢,无法得到较好的优化结果。因此,惩罚因子 P 取值在 $[2, 4]$ 之间有较好的优化结果。

在此基础上,给定了边界条件以及体积约束下,以结构最小柔顺度为目标,即以最大刚度建立优化模型,得到基于变密度理论的SIMP法拓扑优化问题的数学模型见式(3)。

$$\begin{aligned} & \text{Find } x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ & \text{Min } C_{(x)} = U^T K U = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) u_i^T k_0 u_i \\ & \text{S. t. } \begin{cases} V = \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq f V_0 = V^* \\ F = K U \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: x 表示矩阵,是各个单元相对密度的矢量,其中的 x_n 为第 n 个单元的相对密度; $C_{(x)}$ 为结构的柔度函数,要求该函数的最小值; F 为结构所受到的载荷矢量; U 为结构受到载荷后对应的位移矢量; K 为结构刚度矩阵; $f_i(x_i)$ 为惩罚函数,如式(1)所示为 $(x_i)^P$; k_0, u_i 分别为初始单元刚度矩阵和单元位移矢量; V 为优化后的单元体积; v_i 为所划分的第 i 个单元的体积; f 为优化目标的体积分数; V_0 为初始体积; $x_{\min}$ 为单元密度的最小值,理论上应为0,但为了避免出现奇异值,通常取0.001。

拓扑优化中合适的数值算法对于求解有着极其重要的作用,是加快结构拓扑优化的核心,其中优化准则法(OC)从有一定依据的假设出发,建立优化准则的迭代公式,从而进行迭代求解,其具有速度快、迭代次数少的优点。针对式(3)中的优化模型

采用OC法进行求解,构造拉格朗日函数见式(4)。

$$\begin{aligned} L_{(x)} = & C(x) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n x_i v_i - V^* \right) + \lambda_1 (K U - F) \\ & + \lambda_2 (x_{\min} - x) + \lambda_3 (x - x_{\max}) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\lambda, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为拉格朗日乘子。

根据Kuhn-Tucker最优化条件,得到SIMP插值模型式(5)。

$$\frac{P x_i^{P-1} u_i^T k_0 u_i}{\lambda V_i} = 1 = \frac{x_i^{(k+1)}}{x_i^{(k)}} \quad (5)$$

式中: P 为惩罚因子; k 表示第 k 次迭代。

令 $D_i^{(k)} = \frac{P x_i^{P-1} u_i^T k_0 u_i}{\lambda V_i}$,则设计变量的迭代格式

可以写成式(6)。

$$x_i^{(k+1)} = D_i^{(k)} x_i^{(k)} \quad (6)$$

据此,考虑设计变量的上下限,从而得到基于优化准则法的迭代公式(7)。

$$x_i^{(k+1)} = \begin{cases} [D_i^{(k)}]^\xi x_i^{(k)} & x_{\min} < [D_i^{(k)}]^\xi x_i^{(k)} < 1 \\ x_{\min} & [D_i^{(k)}]^\xi x_i^{(k)} \leq x_{\min} \\ 1 & [D_i^{(k)}]^\xi x_i^{(k)} \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: ξ 为阻尼系数,以确保数值计算的稳定性和收敛性。

λ 利用二分法进行迭代逼近。在一次迭代中,一般不希望单元密度有很大变化,因此需要在优化过程中对设计变量的变化进行限制,从而使迭代过程稳定,基于此,Sigmund提出了一种启发式的关于设计变量的迭代格式^[17],引入了移动步长 m ,则迭代格式为式(8)。

$$\begin{aligned} x_i^{(k+1)} = & \begin{cases} \max [x_{\min}, x_i^{(k)} - m] \\ -x_i^{(k)} D_i^{(k)} \\ \min [1, x_i^{(k)} + m] \end{cases} \\ \text{if } & \begin{cases} -x_i^{(k)} D_i^{(k)} \leq \max [x_{\min}, x_i^{(k)} - m] \\ \max [x_{\min}, x_i^{(k)} - m] \leq -x_i^{(k)} D_i^{(k)} \leq \min [1, x_i^{(k)} + m] \\ \min [1, x_i^{(k)} + m] \leq -x_i^{(k)} D_i^{(k)} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

2 SIMP变密度法移动步长优化

2.1 自适应移动步长迭代方法

Sigmund提出的迭代格式通过引入固定的移动步长 m 使收敛速度稳定,对于不同的移动步长 m ,如果数值较小,则会提高迭代步数,降低迭代效率;如果数值较大,则会降低迭代步数,无法获得较好的迭代结果,而且会导致错过最佳迭代点。因此,对于移动步长 m ,基于经验 m 的初始值通常在0.2和0.3之间选取,通常取0.2^[16]。

移动步长在最初迭代中可能会由于单元的过

多删除而影响优化结果,因此希望采取较小的移动步长;当一些次要单元被删除后,剩余组成最优的拓扑单元的密度开始向0,1收敛,此时,对于接近1的单元,希望可以降低删除速率,即减小步长,从而避免删除主要单元;对于密度接近0的单元,希望可以加快单元删除速率,即增大步长,减少迭代次数,从而提高收敛速率^[17]。即当相对密度 x 接近0时, m 尽可能接近1; x 接近1时, m 尽可能接近0; $x=0.5$ 时, m 要小一些,不大于0.5。 m 与 x 之间的关系就是一条在 $y=1-x$ 直线下方的一条线,基于此,笔者提出一种根据惩罚因子 P 进行自适应补偿与设计变量 x 动态调整的自适应移动步长。

中间变量 x 在惩罚函数 $f(x_i) = (x_i)^P$ 的惩罚下以一定的速度向0和1逼近,而移动步长 m 可以看作是对于单元的删除率,可以看出惩罚因子 P 和移动步长的最终目的都是希望相对密度 x 最终能够快速稳定地趋向于0和1,因此希望当 x 接近0和1时,移动步长 m 可以以同样的速度接近1或0,即惩罚因子惩罚后的函数图像在 x 轴由0到1趋近的速度与步长函数在 y 轴由1到0趋近的速度相同,如图2所示。

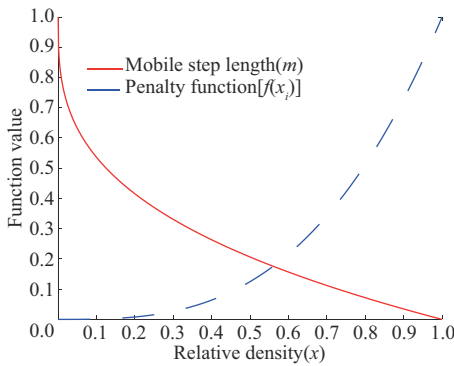


图2 m 与 $f(x_i)$ 的函数图($P=3$)

Fig. 2 Graph of m and $f(x_i)$ ($P=3$)

从图2可以看出,移动步长 m 可由惩罚函数 $f(x_i)$ 图像变换得到 $f(x_i) \xrightarrow{\text{反函数}} f^{-1}(x_i) \xrightarrow{\text{关于x轴对称}} 1 - f^{-1}(x_i)$,最终得到式(9)。

$$1 - f^{-1}(x_i) = m \quad (9)$$

综上所述,可以得到该自适应移动步长的表达式为式(10)。

$$m = 1 - x^{\frac{1}{P}} \quad (10)$$

该自适应移动步长可与惩罚函数形成互补的关系,从而可根据惩罚因子的值获得最佳的移动步

长,即可根据 P 和 x 值自动获得最佳的移动步长。假设惩罚因子 $P=3$,在开始优化时,若 $x_i = 0.5$,此时移动步长 $m=0.2063$;在优化后期,若 $x_i = 0.1$,则 $m=0.5358$;若 $x_i = 0.9$,则 $m=0.0345$ 。

2.2 仿真实验与分析

应用仿真实验方法进行分析,仿真对象选用文献[16]中MBB梁结构案例,实验如下。算力模型取弹性平面应力问题(图3),分别取结构为 20×60 , 30×90 和 40×120 ,上边界中点受一竖直向下的力,弹性模量 E 和泊松比 ν 分别为1和0.3,受力 $F=1$,体积比为0.5。根据结构的对称性,只取一半进行优化。

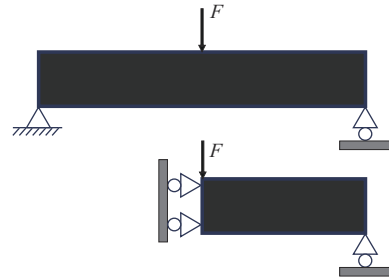


图3 仿真实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of simulation experiment

优化模型见式(11)。

$$\begin{aligned} & \text{Find } x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ & \text{Min } C_{(x)} = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n x_i^3 u_i^T k_0 u_i \\ & \text{S. t. } \begin{cases} V = \sum_{i=1}^n x_i \nu_i \leq 0.5 V_0 = V^* \\ F = K U \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (11) \end{aligned}$$

分别取三种不同网格数量以突出本步长算法在多网格划分下的优势。并采用此仿真实验在相同惩罚因子 $P=3$ 的情况下与现有三种移动步长的表达式进行对比,表1为现有三种移动步长表达式与笔者所提出的表达式。

表1 不同移动步长表达式($P=3$)

Tab. 1 Expressions for different mobile step length ($P=3$)

Method	m	Remark
1	0.2	Fixed step size method proposed in Ref [16]
2	$m_{\max} - (m_{\max} - m_{\min}) x^c$	Variable step size method proposed in Ref [18]. $m_{\max}, m_{\min}, c$ was 0.4, 0.1, 2, respectively
3	$0.1/x$	Variable step size method proposed in Ref [17]
4	$1 - x^{\frac{1}{P}}$	Method of adaptive movement step size according to the penalty function proposed in this paper

图4直观展示了四种移动步长的区别,其中方法1中的移动步长为Sigmund选取的固定值0.2^[16],

通过多次实验测量得到,迭代精度和迭代均处于正常水平,作为对照组;方法2中的 $m_{\max}, m_{\min}, c$ 等参数为文献[18]通过仿真实验获得的数值,近似一条凸函数,在最初迭代时,步长较大,容易误删掉重要单元,实际迭代时易出现结构出错的情况;方法3中移动步长代数式中的分子0.1为文献[17]通过仿真实验获得的数值,整体曲线与本方法较为类似,但在 x 趋近于0时 m 趋于无穷大,当 x 趋于1时仍有迭代步长,因此容易出现反复迭代导致的迭代次数较多的问题;方法4为笔者所提出方法的结果。

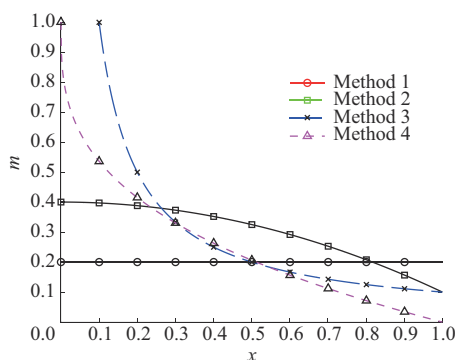


图4 四种移动步长公式对比图

Fig. 4 Comparison of four mobile step length formulas

图5~图7为不同网格划分情况下的仿真实验结果,由于对于同一仿真实验中,在网格划分数量较低的结果中,不可避免地会出现锯齿和灰度单元等现象,并非图片不清晰以及优化算法的问题,在网格划分数量较多的结果中,锯齿和灰度单元现象明显减少,并且结构愈加细致,因此,在该仿真实验中,仅关注主要的迭代结构以及迭代次数即可。

在网格单元划分为 20×60 的仿真中(图5),四种步长优化代码优化的结构相同,在迭代速度上同样差距不大。

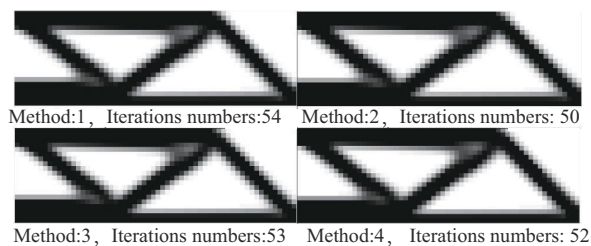


图5 仿真实验结果(网格划分:20×60)

Fig. 5 Simulation results (meshing: 20×60)

在网格单元划分为 30×90 的仿真中(图6),从整体结构上来看,四种方法迭代结果相同,在迭代速度上,方法1~3的迭代次数相近,而本方法的迭代次数减少了1/4,即迭代速度提高了25%。

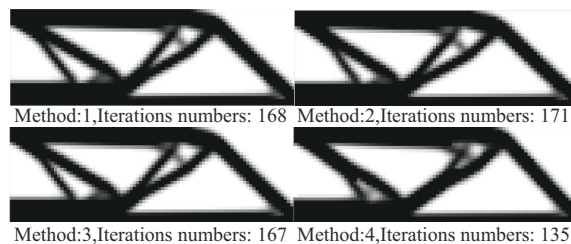


图6 仿真实验结果(网格划分:30×90)

Fig. 6 Simulation results (meshing: 30×90)

在网格单元划分为 40×120 的仿真中(图7),随着网格划分数量的增多,不同步长迭代方法在迭代结果和迭代次数上开始有了显著变化,其中方法1由于采用固定移动步长,随着网格数量的增多,迭代步数随着变量的增多而呈线性增长,但其优势在于足够细致,在迭代过程中不会遗漏重要单元;方法2在结构上出现了缺陷,即在最初迭代过程中误删了重要单元,导致结构与其他三种方法有了显著的不同,在1处缺少重要的支撑结构,虽然有着较快的迭代速度,但并不可靠;方法3和4在结构上与方法1相比在节点处增加了2和3的支撑结构,整体结构更加稳定,但方法3由于其图像在密度趋近1时仍有移动步长,趋近于0时移动步长趋近于无穷,因此迭代步数较多,笔者所提出的方法4则兼顾了迭代速度和结构的稳定性。由此可见,笔者所提出的自适应移动步长方法优化多网格数划分的结构在优化速度上有一定的优势,随着网格数划分的增加,迭代速度最高提升100%。

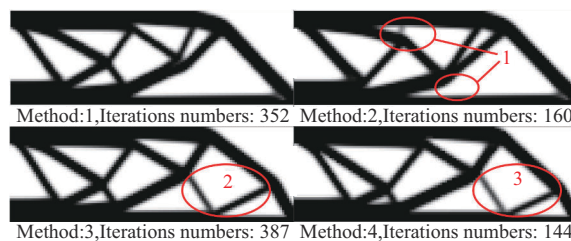


图7 仿真实验结果(网格划分:40×120)

Fig. 7 Simulation results (meshing: 40×120)

3 油门支架结构优化

3.1 测试与表征

优化前零件原始材料为铝合金材质,体积为 156.7 cm^3 ,质量为 409 g 。优化后的零件结构选用碳纤维复合材料进行拓扑优化和打印,密度为 1.3 g/cm^3 ,基体材料为Onyx短切碳纤维填充尼龙材料(71 MPa),强度和刚度为丙烯腈-苯乙烯-丁二烯塑料的1.4倍,其中短切碳纤维直径为 $5 \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$,长度为 $50 \sim 250 \text{ }\mu\text{m}$,占基体总体质量的20%~25%,尼龙

材料种类为尼龙66,增强材料为碳纤维(540 MPa)。

3.2 油门支架结构分析

图8为油门支架结构,由于汽车结构限制,整体呈C字形,且踏板与轴套并不在同一条直线上,整体看作为一个杠杆机构,工作时,汽车驾驶员踩踏踏板,以固定轴套作为支点,通过控制踩踏踏板力度的大小,调整活动轴套的位移大小,从而控制油门的加大或减小。油门支架结构的实际工作情况有正常驾驶和紧急加速两种工况,在正常驾驶时,油门支架结构受力平稳,紧急加速情况下,油门支架需要承受更大的力量,以支持突然的油门输入和相应的加速反应。

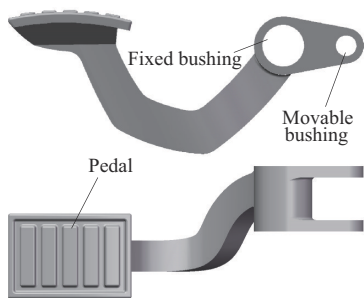


图8 油门支架结构图

Fig. 8 Structural diagram of throttle bracket

3.3 数学模型与优化流程

以第2节提出的改进步长的SIMP变密度法插值方式寻求油门支架结构的拓扑最优分布设计,具体数学模型见式(12)。

$$\begin{aligned} & \text{Find } x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \\ & \text{Min } C_{(x)} = F^T U = U^T K U = \sum_{i=1}^n x_i^3 u_i^T k_0 u_i \\ & \text{S. t. } \begin{cases} V = \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq 0.5 V_0 = V^* \\ F = K U \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

拓扑优化流程如图9所示,首先定义结构的设计域、目标函数与约束条件,进行有限元分析后不断迭代设计变量单元密度,直到满足优化条件后,对最终优化模型进行集合重构,并利用3D打印技术进行制造。

3.4 油门支架结构有限元分析

将油门支架结构在工作时的受力情况可看作为一个杠杆结构,当汽车在正常行驶过程中,驾驶员踩踏踏板的力度为10~20 N,汽车处于快速加速时,驾驶员踩踏踏板的力度为20~50 N,显然,汽车快速加速时油门支架结构的等效应力和位移最大,以此工况下的油门支架作为优化对象,取脚踏板力

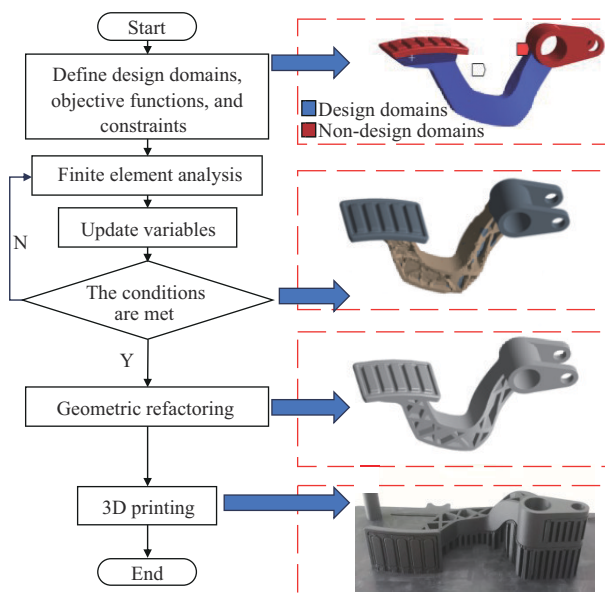


图9 拓扑优化流程

Fig. 9 Topology optimization process

度为50 N,将油门支架结构受力情况简化为杠杆结构,固定轴套部分限制全部自由度,踏板和活动轴套部分受到竖直向下的力,且力矩大小相等,如图10所示。

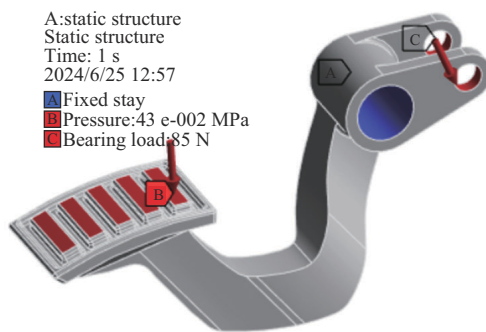


图10 添加载荷

Fig. 10 Adding loads

图11为等效应力云图和位移云图,由图11可以看出,最大应力集中于活动轴套下方,为6.4 MPa,属于拉伸应力,远小于连续纤维材料800 MPa的拉伸强度,故材料强度符合要求;整体最大位移为0.05 mm,在脚踏板的末端,且快速加速的行驶情况较为极端,因此并不影响整体的使用。

3.5 油门支架结构优化与重构

针对上述工况作为优化对象,定义除油门踏板和轴套部分以外部分为设计域,在保证性能的前提下,尽量缩减体积、减轻质量,因此设置柔度最小的优化目标,分别设置体积约束分数为60%,65%,

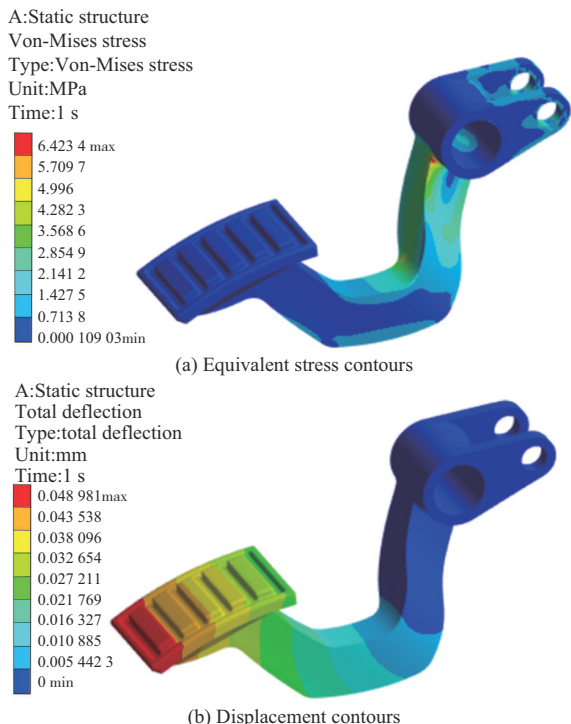


图 11 油门支架结构等效应力与位移云图

Fig. 11 Equivalent stress and displacement contours of throttle bracket structure

70%进行试验,表2为优化方案与结果。

表2 优化方案与结果

Tab. 2 Optimization scheme and results

Scheme	Volume constraint score/%	Equivalent stress/MPa	Displacement/mm
1	60	10.56	0.102
2	65	7.24	0.072
3	70	6.96	0.068

由表2可以发现,优化方案中随着体积约束分数的降低,等效应力和位移均有所提高,而方案1中提及约束分数过小,删除材料过多,导致位移和等效应力增加过大;方案3在等效应力和位移表现上较好,但体积约束分数较大,删除的材料较少。综合相比之下,选择方案2的优化结果作为拓扑优化结果,并进行二次重构(图12)。

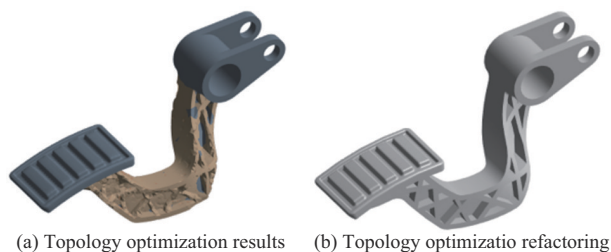


图 12 拓扑优化结果与重构

Fig. 12 Topology optimization results and refactoring

4 复合材料增材制造应用

4.1 打印材料及设备

利用美国 Markforged 公司的双喷头连续纤维打印机 Mark Two 型,切片软件为 Markforged Digital Source,以连续纤维为体积分数 35% 的复合材料进行打印^[12],其中基体材料为短切碳纤维填充尼龙丝材 Onyx,纤维增强材料为浸润后的连续碳纤维束,其打印原理如图 13 所示。由图 13 可见,打印机两个喷头相互独立,利用剪切装置切断送料以实现喷头的切换,样件打印时利用 G 代码将数据传入打印机,打印 Onyx 基材时,通过加热块融化 Onyx 材料挤出到平台上,冷却后实现打印,打印纤维时,加热块加热以融化预浸润纤维表层的树脂材料,使纤维黏附在打印平台上,实现打印。每完成一层打印后,打印平台会下降一个层高的间距实现下一层的打印。其中设置每层层高为 0.125 mm,Onyx 材料喷嘴温度为 275°,纤维喷嘴温度为 210°,打印速度 15 mm/s。

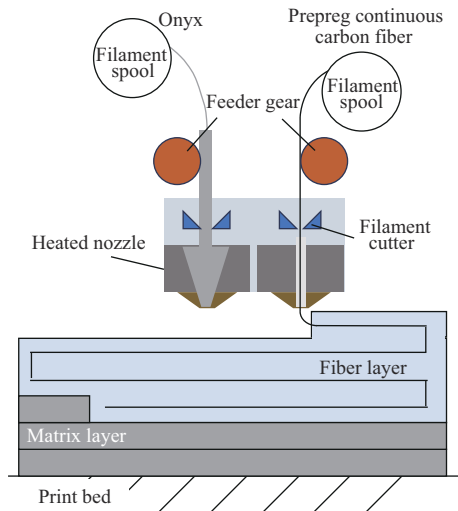


图 13 双喷头连续纤维打印机工作原理

Fig. 13 A dual-printhead continuous fiber printer works

4.2 油门支架结构 3D 打印

将优化后的油门支架结构平放至平台上进行打印,图 14a 为零件打印的部分纤维路径分布平面图,图 14b 为整体纤维路径分布三维图,图 14c 为打印过程。为了保证最终打印零件性能的各向同性,零件的打印顺序及方向为:在大范围处优先采用 X, Y 方向交叉打印,在区域狭窄处,如边框、支撑处,按照其他角度或沿着结构边缘打印。

油门支架结构在正常使用过程中,所受到的力远小于自身的极限应力,因此在强度上不做校核,

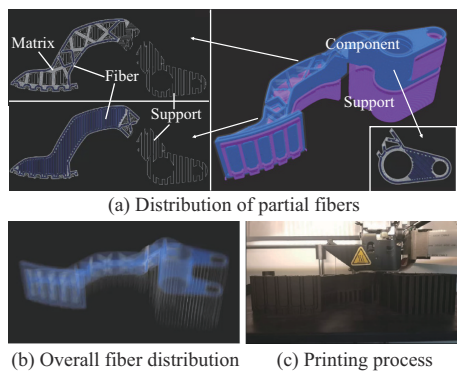


图14 样件制备

Fig. 14 Sample preparation

对打印好的油门支架结构进行质量校核,图15为打印好的油门支架结构。

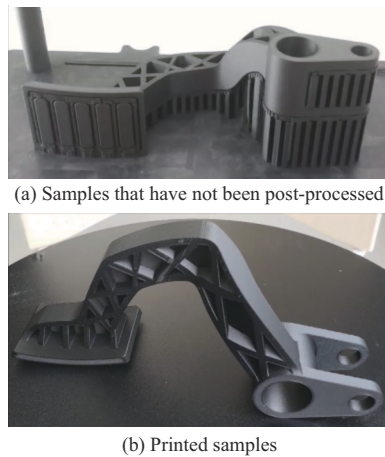


图15 打印好的油门支架零件

Fig. 15 Printed throttle bracket parts

4.3 轻量化校核

对打印得到的油门支架结构进行数据分析,见表3。优化前铝合金材质等效应力为6.4 MPa,位移0.05 mm,质量409 g;优化后等效应力7.24 MPa,仅增加0.84 MPa,远小于碳纤维复合材料屈服强度极限,位移为0.072 mm,相比于优化前有微小的增大,质量为212 g,减轻了48%,达到了轻量化的效果。

表3 优化前后数据

Tab. 3 Data before and after optimization

Optimization	Materials	Equivalent stress/MPa	Displacement/mm	Volume/cm ³	Mass/g
Before	Aluminum alloy	6.4	0.05	157	409
After	Fiber-reinforced composite	7.24	0.072	116	212

5 结论

(1)提出了一种基于惩罚因子 P 的自适应移动步长改进算法,该算法可根据设计变量 x 的值自适应调整移动步长,在多网格数划分的结构优化场景

下具有较快的迭代速率,通过经典实验算例,与其他迭代方法对比,验证了本方法优化速率上的优势,至多可提高100%。

(2)对油门支架结构在加速工况的极端情况下进行静力学分析与拓扑优化,使体积减小30%,并用体积分数35%的长碳纤维复合材料进行打印,使结构在力学性能不受到显著影响的前提下,质量减轻48%。

参考文献

- [1] 朱继宏,周涵,王创,等.面向增材制造的拓扑优化技术发展现状与未来[J].航空制造技术,2020,63(10):24-38.
ZHU Jihong, ZHOU Han, WANG Chuang, et al. Status and future of topology optimization for additive manufacturing. aeronautical manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(10):24-38.
- [2] MARTIN P B, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1988, 71(2):197-224.
- [3] 聂文建.基于变密度拓扑优化方法的算法改进研究[D].大连:大连理工大学,2020.
NIE Wenjian. Research on algorithm modifications based on density-based topology optimization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [4] 牛西茜,李昕莹,李佩泽.基于变密度法的飞机襟翼拓扑优化设计[J].兵器装备工程学报,2024,45(3):101-106.
NIU Xixi, LI Xinying, LI Peize. Topology optimization design of aircraft flap based on variable density method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(3):101-106.
- [5] 刘英杰,胡强,赵新明,等.汽车发动机连接支架拓扑优化及增材制造研究[J].中国机械工程,2023,34(18):2 238-2 247, 2 267.
LIU Yingjie, HU Qiang, ZHAO Xinming, et al. Research on topology optimization and additive manufacturing of automotive engine connection brackets[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(18):2 238-2 247, 2 267.
- [6] 李恒,严文凯,陈逸豪,等.基于拓扑优化的四旋翼无人机机身轻量化设计[J].工程塑料应用,2023,51(2):60-66.
LI Heng, YAN Wenkai, CHEN Yihao, et al. Lightweight design of four-rotor UAV fuselage based on topology optimization[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(2):60-66.
- [7] LIN C Y, SHEU F M. Adaptive volume constraint algorithm for stress limit-based topology optimization[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(9):685-694.
- [8] 匡兵,刘娟,段君伟,等.基于改进灵敏度过滤策略的SIMP方法[J].计算力学学报,2017,34(1):81-87.
KUANG Bing, LIU Juan, DUAN Junwei, et al. SIMP method based on modified sensitivity filtering strategy[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 34(1):81-87.

- [9] 廉睿超,敬石开,杨海成,等.考虑分区混合权重的敏度过滤方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2019,31(5):842-850.
LIAN Ruichao, JING Shikai, YANG Haicheng, et al. Sensitivity filtering method considering partition blending weights[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(5): 842-850.
- [10] 宋国新,冯雨.增材制造技术在航天液体动力领域的应用[J].中国航天,2023(5):53-58.
SONG Guoxin, FENG Yu. Application of additive manufacturing technology in space liquid propulsion[J]. Aerospace China, 2023 (5):53-58.
- [11] 张亚莲,常若寒,姚草根,等.增材制造技术的研究应用进展:由3D到4D[J].宇航材料工艺,2022,52(2):67-75.
ZHANG Yalian, CHANG Ruohan, YAO Caogen, et al. The research and application development of additive manufacturing technology: From 3D to 4D[J]. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, 2022, 52(2):67-75.
- [12] 琚裕波,李智,柏挺,等.低成本碳纤维的研究进展与应用[J].工程塑料应用,2023,51(11):181-186.
JU Yubo, LI Zhi, BAI Ting, et al. Research progress and application of low-cost carbon fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(11):181-186.
- [13] 熊婷,钱波,胡珍涛,等.基于连续纤维增材制造工艺的四旋翼无人机拓扑优化[J].工程塑料应用,2023,51(10):76-84.
XIONG Ting, QIAN Bo, HU Zhentao, et al. Topology optimization of quadcopter unmanned aerial vehicle based on continuous fiber additive manufacturing process[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10):76-84.
- [14] 张坤,张丹,邹瑞睿,等. CFRP在汽车轻量化中的应用研究进展[J].工程塑料应用,2022,50(10):154-158, 163.
ZHANG Kun, ZHANG Dan, ZOU Ruirui, et al. Application research progress of CFRP in automobile lightweight[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(10):154-158, 163.
- [15] 吴方贺.碳纤维复合材料发动机罩结构设计与优化[D].长春:吉林大学,2017.
WU Fanghe. Structural design and optimization of carbon fiber reinforced plastic engine hood[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [16] 田凯.电动汽车碳纤维复合材料保险杠防撞梁轻量化设计[D].长春:吉林大学,2019.
TIAN Kai. Lightweight design for carbon fiber composite material anti-collision beam of electric car[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [17] SIGMUND O. A 99 line topology optimization code written in Matlab[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21 (2):120-127.
- [18] 吴顶峰.基于变密度法的连续体结构拓扑优化研究[D].西安:西安电子科技大学,2010.
WU Dingfeng. Research on topology optimization of continuum structure based on variable density method[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.
- [19] 李好.基于变密度法的连续体结构拓扑优化方法研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
LI Hao. Research on topology optimization methods of continuum structure based on variable density method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.