

文章编号: 1006-2343(2021)05-035-06

柔性夹钳的拓扑优化设计及其 3D 打印制造

郭南辛^{1,2}, 王 冲¹, 王强龙¹, 陈苡生^{1,2}, 刘震宇^{* 1}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033, E-mail: 15161163593@163.com;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术研究院, 北京 100039)

摘 要: 拓扑优化方法可用于柔性变形机构的创新性设计, 3D 打印技术为拓扑优化结果提供了一个快捷有效的制造方式。但拓扑优化方法所设计的柔性夹钳常常存在较为明显的集中铰链, 受 3D 打印加工条件和材料的限制, 这种铰链特征往往难以保证结构的可制造性和正常的使用。因此需要在设计过程中采用较大的输入输出弹簧刚度系数以避免铰链的出现, 而此时所得到的结构的变形能力又非常有限。基于此, 为了同时保证结构的可制造性和变形能力, 以熔融沉积(FDM)加工技术为制造基础, 讨论了拓扑优化结构再设计和双材料的引入对夹钳柔度的改善。数值分析和实验的结果表明, 拓扑优化理论可以快速的为柔性机构提供较优的几何构型, 通过结构的改进和打印材料的分配, 能够同时兼顾结构的制造和变形能力。

关键词: 拓扑优化; 柔性机构; 3D 打印; FDM 技术

中图分类号: TH112.5 **文献标识码:** A

DOI: 10.13952/j.cnki.jofmdr.2021.0176

Topology Optimization Design and 3D Printing of Compliant Gripper

GUO Nanxin^{1,2}, WANG Chong¹, WANG Qianglong¹, CHEN Yisheng^{1,2}, LIU Zhenyu^{* 1}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of science, Changchun 130033, China;

2. School of Material Science and Opto-Electronic Technology, University of the Chinese of Academy of science, Beijing 100039, China)

Abstract: Topology optimization method can be used for innovative design of compliant deformation mechanism. 3D printing technology provides a quick and effective manufacturing method for topologically optimized designs. However, compliant grippers designed by topology optimization usually have obvious concentrated hinges that make it difficult to ensure the manufacturability and normal use of structures due to the limitations of 3D printing processing conditions and materials. Therefore, it was necessary to use a larger input and output spring stiffness coefficient in the design process to avoid the emergence of hinges. But the deformation capacity of the structure was also limited as a result. For this reason, in order to ensure the manufacturability and deformability of the structure, based on the FDM (Fused Deposition Modeling) manufacturing technology, the topology optimization structure redesign and the introduction of bi-material are discussed to improve the flexibility of the gripper. The results of numerical analysis and experiment show that topology optimization theory can quickly provide better geometric configuration for compliant mechanism. Through the improvement of structure and the distribution of printing materials, the manufacturing and deformation ability of the structure can be considered at the same time.

Key words: topology optimization; compliant mechanism; 3D printing; fused deposition modeling

传统的结构设计往往希望得到刚度最大的结构, 而柔性机构则是在柔度和刚度中寻求平衡点^[1-2]。柔性机构通过材料的变形来实现运动、力或者能量传递的机械装置, 其本质上可以减少构件的数目, 省去过多的装配, 并且不需要铰链或轴承等运动副, 因此可以实现高精度的运动, 易于大批

量生产。由于柔性机构存在以上优点, 使得它在精密机械, 生物工程, 光学工程等领域有着广泛的应用^[3-4]。

通常的柔性机构的设计方法分为两类, 刚体替代法^[5-6]和拓扑优化方法^[7-8]。刚体替代法一般是从一个可以实现预定任务的刚体机构入手, 通过把刚性构件和运动副替换为柔性单元或者是柔性铰链, 将刚体机构转化为柔性机构。而拓扑优化方法是通过在给定的区域对材料进行再分布, 所设计的柔性机构整体或大部分都可以变形, 并且在设计上有着

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51675506)

*: 通讯作者

更多的灵活度,可以创造新的结构构型。

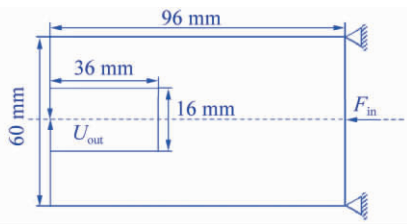
由于柔性机构的特殊性——柔性刚性的结合,通过拓扑优化所设计的结构在成形制造上存在则一定的复杂度。3D 打印技术以结构的三维 CAD 数据模型为基础,运用粉末状金属或塑性材料,通过逐层增加材料的制造方式,以较为便捷直接的方式得到所需要的结构。其中熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling, FDM)技术^[9-10]由于其操作简单,可加工材料多,成型速度快等优点,受到了越来越多的研究者的关注。一般来说,FDM 技术可选择材料有 PLA(聚乳酸),ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物),TPU(热塑性聚氨酯弹性体橡胶),PVA(聚乙烯醇),Wood 木质感材料等等^[11]。材料性质各异,包含有柔性材料 TPU,刚度较大的 PLA、ABS 材料和水溶性材料 PVA。因此,FDM 制造技术可以很好的满足复杂柔性机构的生产制造,同时也存在很多的可操作性。

基于此,本文将运用柔性机构拓扑优化理论进行设计,采用带有惩罚项的各向同性材料(Simplified Isotropic Material with Penalization, SIMP)插值模型^[12]。以柔性夹钳为例,使用 FDM 技术为制造方式,为兼顾结构的制造和变形能力,讨论了不同材料和不同再设计结构对柔性夹钳柔度的影响,通过仿真与实验来验证结构的可用性和合理性,以便于提供更多的柔性机构的制造思路。

1 柔性机构拓扑优化理论及优化设计

1.1 柔性夹钳拓扑优化模型

为了承受施加的载荷并产生特定的位移,柔性机构需要具有一定的刚度和柔度。图 1 展示了这样一个柔性夹钳设计区域,它受到来自输入端的力 F_{in} ,并在输出端口产生一定的输出位移 U_{out} 。柔性夹钳拓扑优化的目标是为了获得输入功转化为预定



▲图 1 夹钳的设计域

方向的输出位移或力的优化设计。基于 SIMP 法的材料插值模型,以密度值作为设计变量,其数学公式表示为受到目标体积分数的约束时互应变能(Mutual Potential energy, MPE)的最大化^[13]。

$$\max MPE \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{s. t. } \sum_{e=1}^N \rho_e \frac{V_e}{V_{Tot}} &\leq V^* \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho_e &\leq 1, e = 1, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: ρ_e 为第 e 个单元的密度, N 为有限单元的个数, V_e 为第 e 个单元的体积, V_{Tot} 为设计域的总体积, $\rho_{\min}$ 为最小的密度值,一般设定为 10^{-4} 。

由 SIMP 插值模型,每个单元的材料属性由式(3)表示:

$$E(\rho_i) = \rho_i^p E \quad (3)$$

式中: E 表示固体材料的杨氏模量, p 是罚因子,取值为 3。

1.2 敏度分析

为了了解敏度,从公式(4)互应变能 MPE 的定义可知,

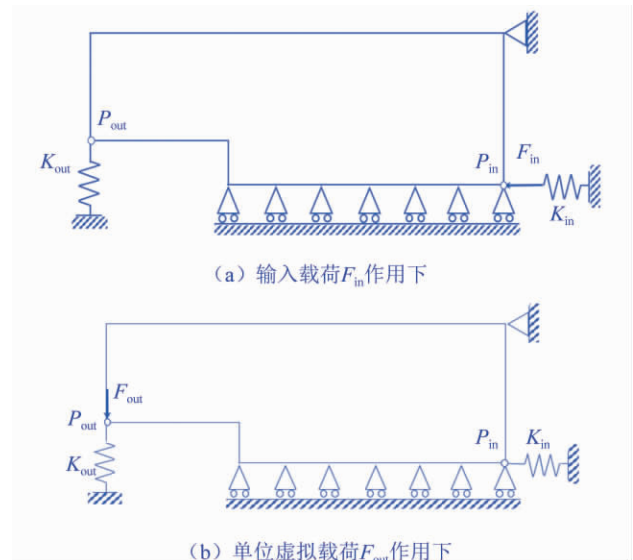
需先求解两种载荷工况。由于柔性夹钳上下对称,因此取上半区域表示载荷工况的情况,如图 2 所示,两种工况分别为:

(1) 输入力作用的情况,输入力 F_{in} 作用于输入端口 P_{in} 上;
(2) 虚拟载荷作用的情况,单位虚拟载荷 F_{out} 作用于输出端口 P_{out} 上。采用图 2 中的弹簧模型来定义输入和输出端口的刚度比,人工输入弹簧 K_{in} 和输入力来模拟真实的输入情况,对于输出位移的阻力用一个刚度为 K_{out} 的弹簧来表征。由公式(5)和公式(6)得到两组位移向量,可求得单元敏度的表达式,如公式(7)所示:

$$MPE = U_1 K U_2 \quad (4)$$

$$F_1 = K U_1 \quad (5)$$

$$F_2 = K U_2 \quad (6)$$



▲图 2 载荷工况的表示

$$\alpha_e = -px_e^{p-1} U_{1e} K_e U_{2e} \quad (7)$$

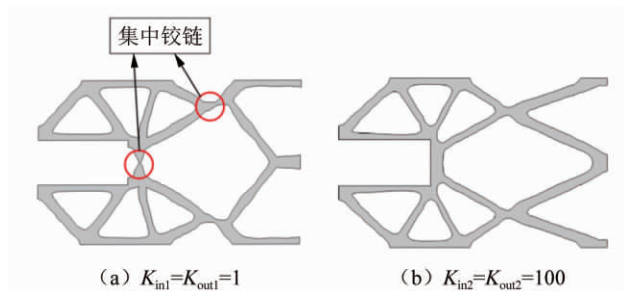
式中: α_e 为单元敏度数, K_e 为第 e 个单元的刚度矩阵, U_{1e} 为施加载荷 F_{in} 时第 e 个单元的位移向量, U_{2e} 为施加载荷 F_{out} 时第 e 个单元的位移向量。

1.3 柔性夹钳的拓扑优化设计

通过柔性机构拓扑优化理论设计能实现较大位移的柔性夹钳,在拓扑优化设计阶段可以通过改变 K_{in} 和 K_{out} 数值来控制结构的刚柔度,如果 K_{in} 与 K_{out} 的取值越小,结构的柔度会越大,越容易变形。优化过程使用商用 Comsol 有限元软件自行二次开发的拓扑优化程序^[14],通过 Comsol 软件进行几何建模和有限元网格的划分,考虑两组弹簧刚度系数,取 $K_{in1} = K_{out1} = 1$, $K_{in2} = K_{out2} = 100$ 。设计区域如图 1 所示,大小为 $96 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$,输入力 $F_{in} = 30 \text{ N}$ 位于右边缘中心,体积约束为设计区域的 30%,弹性模量 $E = 2.63 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.36$ 。

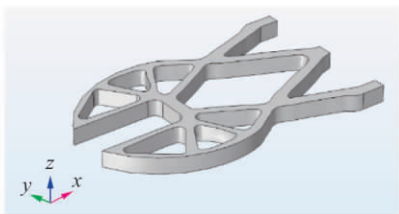
两组不同的刚度系数得到的优化结果如图 3 所示,通过图 3(a) 所示可知较小的弹簧刚度系数所得到的结构会存在明显的集中铰链特征,该部分非常薄弱,在 3D 打印制造中难以保证其制造精度,容易出现局部材料的缺失,并且在使用过程中容易因为应力集中导致该铰链部分断裂,影响正常的使用。当弹簧刚度系数取值较大时,如图 3(b) 所示,结构中

铰链的特征将不再那么明显, 可以进行3D打印制造, 但在输入力 F_{in} 的作用下结构的变形能力非常有限, 无法满足柔性机构的正常使用。



▲图3 不同弹簧刚度系数下的几何构型

首先考虑结构的可制造性, 本文将选择图3(b)中的二维结构构型, 此时输入输出端弹簧刚度系数 K_{in} 和 K_{out} 取值为100。将该构型沿Z轴拉伸为三维实体结构, 其拉伸厚度如果过小, 其结构在变形的过程中容易造成明显的屈曲, 而厚度过大, 则其结构难以变形, 因此拉伸厚度需要与整体结构尺寸相匹配, 取拉伸厚度为6 mm, 最后再将拉伸后的结构的轮廓光滑化, 得到的三维模型如图4所示。

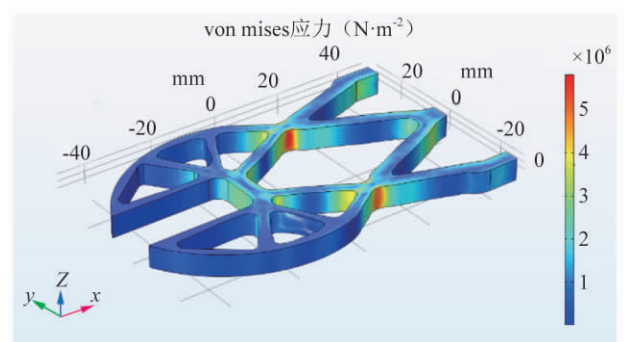


▲图4 夹钳的三维模型

2 考虑形变能力的柔性夹钳设计

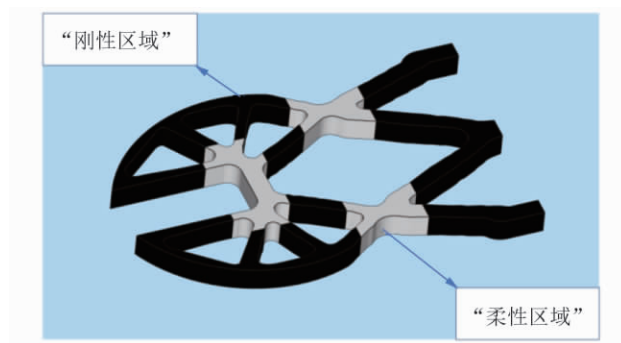
设计阶段考虑以PLA材料进行夹钳的设计, 以FDM(熔融沉积)3D打印技术进行柔性夹钳的制造, 但PLA材料刚度较大, 如果运用图4得到的三维构型直接进行3D打印, 柔性夹钳的变形能力难以满足要求。材料的选择上, 除了PLA等刚度较大的材料外, 还存在着软材料如TPU材料。但当整个结构的材料全由TPU材料组成时, 结构又会因柔度过大, 导致结构无法提供足够的输出力, 并且容易产生屈曲。因此, 需要考虑采用一些方式平衡结构的柔度与刚度。

柔性夹钳需要通过其自身结构的形变来实现输出端的夹持力和目标位移。通过拓扑优化所设计的柔性夹钳的结构大部分都可以变形, 但整体来讲, 变形也存在主次之分。因此通过对其进行有限元仿真分析, 得到 von mises 应力图如图5所示, 可以了解到结构中主要的变形区域。通过区分



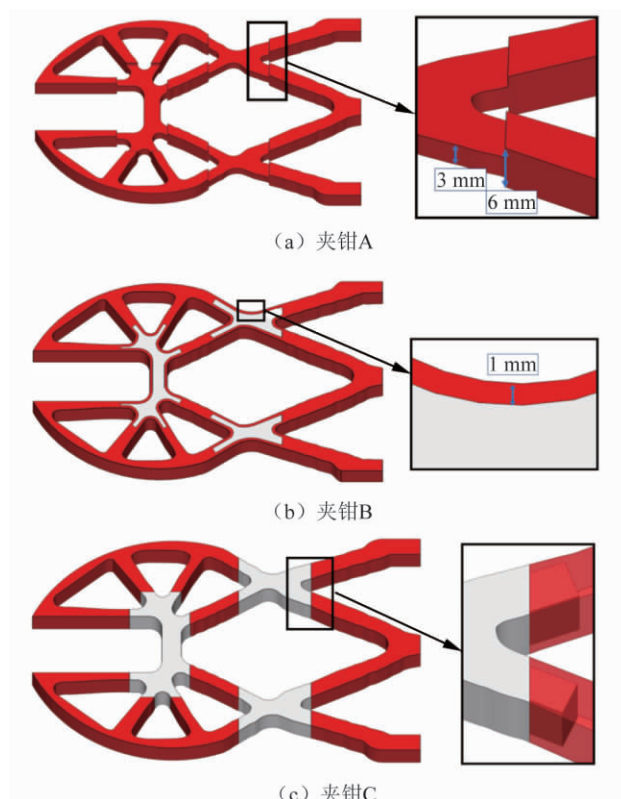
▲图5 夹钳 von mises 应力图

变形的主次有利于后续柔性夹钳的结构后处理和材料的分配。由于输入端和固定端需要直接接触外部结构, 因此这些区域需要足够的刚度, 否则会因为变形消耗了大量的驱动力。通过 von mises 应力图, 定义应力较大的区域为“柔性区域”, 而剩下的部分则定义为“刚性区域”, 如图6所示, 其中“柔性区域”为重点进行讨论处理的部分。



▲图6 “刚柔”性区域的划分

受材料和加工方式的限制, 现讨论三种不同的方案改进柔性夹钳的柔度, 如图7所示, 其中红色表示PLA材料, 白色表示TPU材料:



▲图7 三种方案的三维模型

方案一: 保留“柔性区域”内沿拉伸方向(Z轴)的厚度共3 mm, 两侧减少值均为1.5 mm, 以PLA材料进行制造, 如图7(a)所示。如果保留的厚度小于3 mm, 结构的变形容易造成屈曲, 影响柔性夹钳的使用。

方案二: 保留“柔性区域”轮廓处的材料, 沿构型外边界法线方向保留1 mm的壁厚, 而将内部掏空并填充为TPU材料, 其余部分以PLA材料进行制造, 如图7(b)所示。受FDM

打印技术的限制,如果壁厚过于小,在制造过程中容易在壁厚处出现空洞,因此保留 1 mm 较为合理。

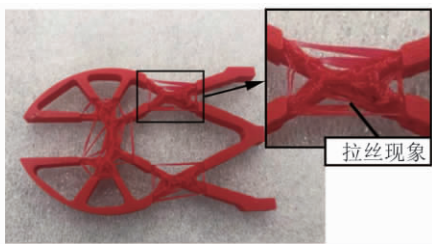
方案三:将“柔性区域”使用 TPU 材料进行制造,“刚性”区域使用 PLA 材料,由于两种材料的连接能力有限,因此在结构的设计时考虑增加两部分结构的接触面积,三维模型及部分结构透视图如图 7(c) 所示。

3 柔性夹钳 3D 打印制备

将以上的三维柔性夹钳文件转化为 STL 格式的文件,该格式可以直接运用于 3D 打印。设备选择的是 Raise 3D E2,其包含两个喷嘴,可以实现两种材料的同时打印,打印所用到的材料型号分别为 PolyLite PLA(红色),Raise 3D PVA(白色),PolyFlex TPU95(白色),为保证打印的质量,填充率均使用 50%,打印层厚为 0.1 mm,打印速度为 40 mm/s。

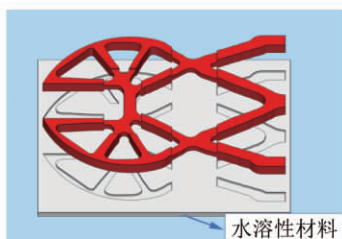
方案一中改变了柔性区域的厚度,其结构上存在悬臂。

如果直接进行 3D 打印制造,将会产生大量拉丝如图 8 所示,严重影响夹钳底部的表面光滑度,因此在 3D 打印时可引



▲图 8 夹钳 A 不加支撑 3D 打印结果

入水溶性支撑结构,如图 9(a) 白色部分,通过 PVA 材料来生成,最后放入温水中即可去除。需要注意的是 PLA 材料的耐热温度为 60~80 摄氏度,去除 PVA 支撑时水温不要超过该范围,最后取约 50℃ 水溶液。这种 PVA 材料的应用降低了模型损坏的风险,在使用之后容易处理,非常适合复杂的柔性机构的打印。该方案的打印结果及 PVA 材料的去除如图 9



(a) 3D 打印模型

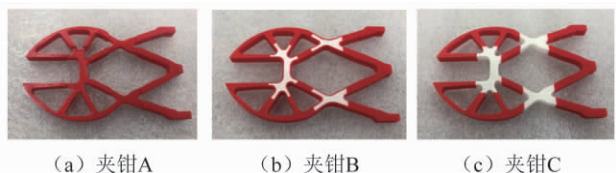


(b) 水溶性材料的去除

(b)。最终夹钳 A 的制造结果如图 10(a) 所示。及水溶性 PVA 材料的去除

方案二在打印过程中应避免薄壁上出现空洞或者不连接的情况,可适当调节打印速度和打印层厚。打印结果如图 10(b) 所示。

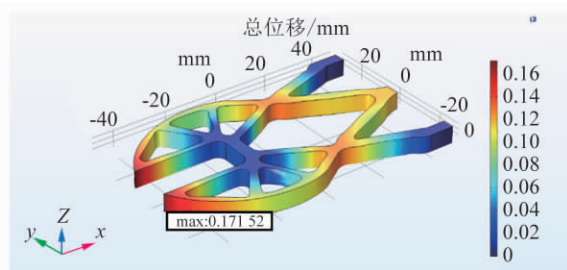
方案三可直接进行打印,打印结果如图 10(c) 所示。



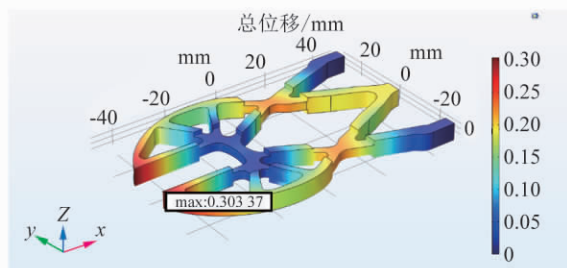
▲图 10 3D 打印结果

4 有限元仿真分析与位移检测实验

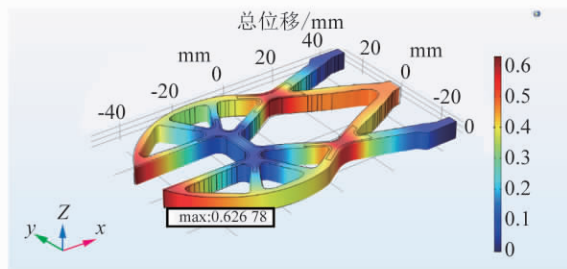
通过以上三种方案平衡结构的刚度和柔度,为分析不同方案对结构柔度的影响,将初始结构和三种夹钳通过 Comsol 软件进行有限元仿真分析,以评估输入力与输出位移的关系。输入力设置为 30 N, PLA 材料和 TPU 材料的弹性模量分别取为 263 GPa 和 0.009 6 GPa, PLA 材料和 TPU 材料的泊松比分别为 0.36 和 0.49^[15-16]。有限元仿真输出位移结果如图 11 所示,结果表明,三种不同的方案一定程度上都增加了结构的柔度,同样的输入载荷,分别可以产生不同倍率的输出位移,并且最大位移值均出现在输出端口处,保持了原构型的传力路径。



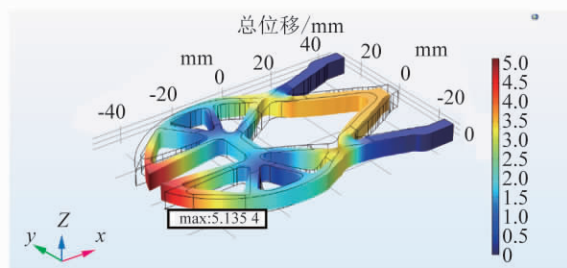
(a) 初始结构



(b) 夹钳 A



(c) 夹钳 B

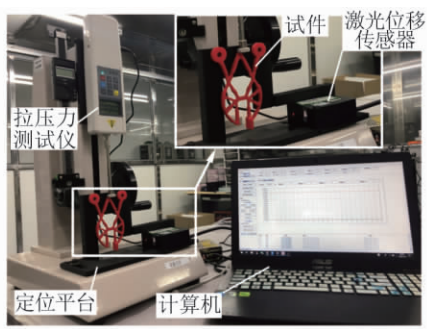


(d) 夹钳 C

▲图 11 有限元分析模型及位移结果

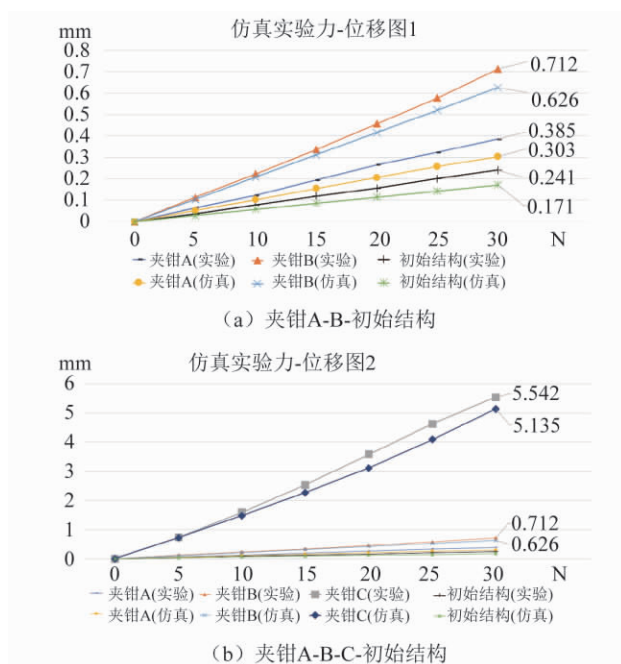
为了以实验结果验证上述三种方案对柔性夹钳柔度的影响,通过输入相同的力,以检测输出端位移的变化。实验平台如图 12 所示,包含有庞络 PL-IG80-D2A1 型激光位移传感器,艾德堡 HP-4K 拉压力测试仪,实验定位平台,计算机,

庞络传感器测控软件 LDS_V2_3 以及各个柔性夹钳试件。其中传感器是基于激光三角测量原理的高性能位移测量传感器,重复精度可达 $1\text{ }\mu\text{m}$,采样频率最高 20 kHz 。拉压力测试仪最大分辨率为 0.000 1 N ,最大负载为 1 000 N 。



▲图12 输出位移检测实验平台

输入力从 0 到 30 N ,取多次检测的平均值,可以得到各个夹钳的输入力与输出位移的关系曲线,如图13所示。由于夹钳C的相对位移较大,因此考虑使用两个图来共同描述所有夹钳的实验与仿真的情况,其中图13(a)中不包含夹钳C,图13(b)则体现了所有夹钳的数据信息。



▲图13 输入力与输出位移关系图

从图13可知,实验结果与仿真结果的曲线趋势一致,通过实验所得结果位移值均大于仿真所得位移值,这是因为FDM制造时填充率的选择的影响,制造过程中结构内部存在一定间隙,所以相应的增大了结构的柔度。通过输入 30 N 的力,实验中夹钳A,B,C分别可以实现 0.385 mm , 0.712 mm , 5.542 mm 的输出位移,相比于初始结构 0.241 mm 的输出位移,均有不同程度的提高。

同时通过实验和仿真的结果可以了解到如果3D打印机可以同时实现多种材料打印,运用TPU软材料和PLA双材料进行打印,可以直观的提高夹钳的输出位移。当只有单材料可供选择时,也可以通过改变“柔性区域”的厚度来改善其整体结构的柔度,如果需要继续增加夹钳的输出位移,可以适当增加“柔性区域”的范围,以此满足柔性机构的使用。

6 结论

(1) 以拓扑优化设计方法为基础,选择合适的弹簧刚度系数以避免在设计夹钳时集中铰链的出现,为保证柔性夹钳的形变能力,分别讨论了三种方案来兼顾柔性夹钳的FDM 3D打印制造和结构的柔度。

(2) 为保证三种夹钳制造结果的可用性,通过一些结构的处理和水溶性PVA材料的引入来实现夹钳的3D打印制造。最后以TPU材料和PLA材料中的一种或者两种来形成夹钳的结构。

(3) 通过仿真和实验同时验证了三种方案的可行性和合理性,都在不同程度上改善了结构的柔度。拓扑优化与3D打印的结合能快速得到柔性机构的构型并进行制造,为柔性机构的设计提供了更多的思路。

参考文献

- [1] 张成, 褚金奎, 张然, 等. 柔性微夹钳的拓扑优化设计及制作工艺[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(5): 44-46.
- [2] PEDERSEN C B W, BUHL T, SIGMUND O. Topology synthesis of large-displacement compliant mechanisms [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2010, 50(12): 2683-2705.
- [3] 于靖军, 郝广波, 陈贵敏, 等. 柔性机构及其应用研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 53-68.
- [4] CAI H, YANG Z, DING G, et al. Development of a novel MEMS inertial switch with a compliant stationary electrode [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(7): 801-808.
- [5] Pei X, Yu J, Zong G, et al. An effective pseudo-rigid-body method for beam-based compliant mechanisms [J]. Precision Engineering, 2010, 34(3): 634-639.
- [6] 褚金奎, 曹建玉, 卫静. 采用伪刚体法的柔性微夹钳设计[J]. 机械设计与研究, 2008(2): 47-49.
- [7] 李兆坤, 张宪民. 多输入多输出柔顺机构几何非线性拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 180-188.
- [8] 寇鑫, 葛文杰, 张永红. 多点协调变形柔性微夹持机构及其支撑综合拓扑优化[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(5): 751-755.
- [9] MOHAMED O A, MASOOD S H, BHOWMIK J L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects [J]. Advances in Manufacturing, 2015(1): 42-53.
- [10] PATEL R, PATEL S, PATEL J. A review on optimization of process Parameter of fused deposition modeling for Better Dimensional Accuracy [J]. Journal of Experimental Psychology, 2014, 92(2): 225-231.
- [11] 张胜, 徐艳松, 孙姗姗, 等. 3D打印材料的研究及发展现状[J]. 中国塑料, 2016, 30(1): 7-14.
- [12] SIGMUND O. A 99 line topology optimization code written in Matlab [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 120-127.
- [13] ALONSO C, QUERIN O M, RUBÉN ANSOLA. A sequential element rejection and admission (SERA) method for compliant mechanisms design [J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2013, 47(6): 795-807.
- [14] LIU Z, KORVINK J G. Using artificial reaction force to design compliant mechanism with multiple equality displacement

constraints [J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2009, 45 (8-9): 555-568.

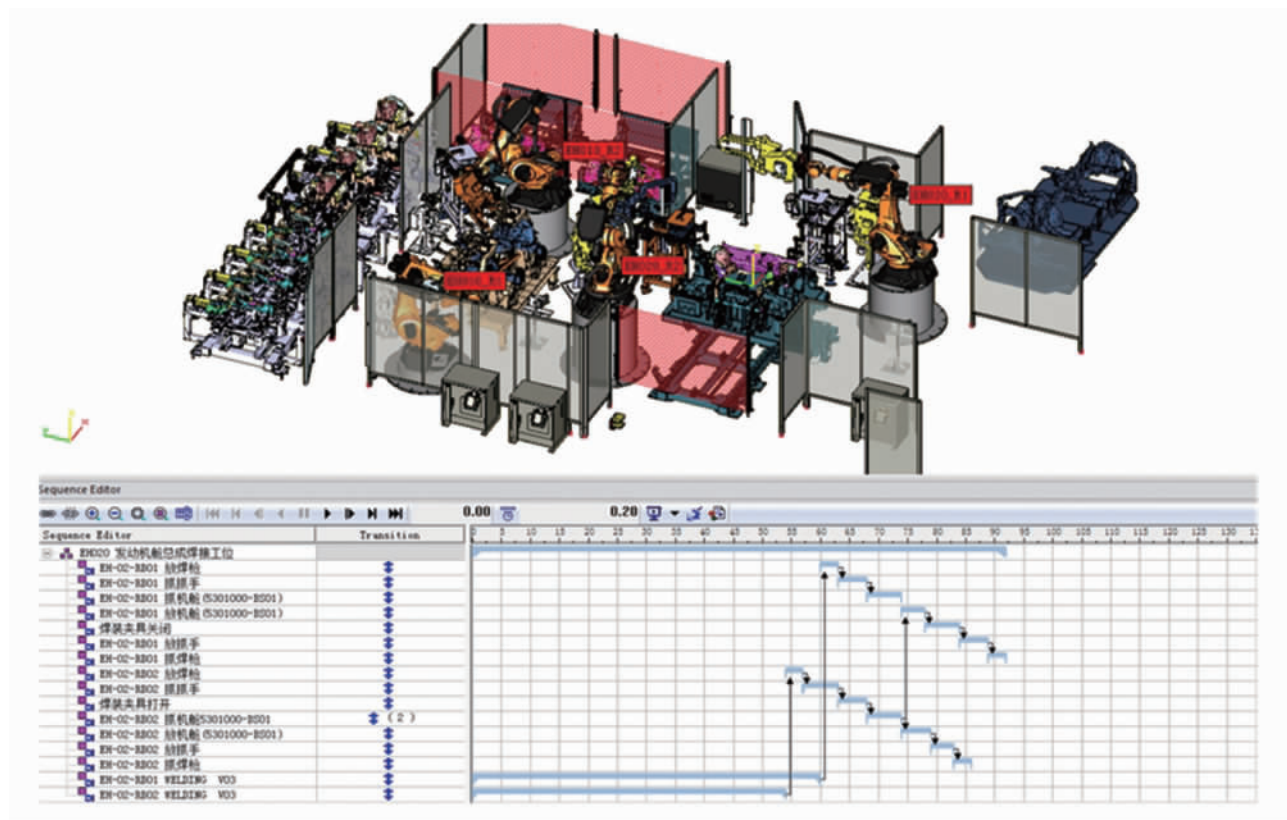
[15] QI H J, BOYCE M C. Stress-strain behavior of thermoplastic polyurethanes [J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(8): 817-839.

[16] LI X, GUO C, LIN X, et al. Impact behaviors of poly-lactic acid

based biocomposite reinforced with unidirectional high-strength magnesium alloy wires [J]. Progress in Natural Science Materials International, 2014(5): 472-478.

作者简介: 郭南辛(1997—),男,硕士研究生;主要研究方向为柔性机构的拓扑优化设计及其3D打印制造。

(上接第 26 页)



▲图 11 EH020 工位仿真时序图

参考文献

- [1] 李国军. 汽车车身焊接的智能化与自动化 [J]. 山西电子技术, 2014(3): 48-49.
- [2] 金嘉琦, 曲晨, 王靖远. 基于改进 ACO 的机器人路径规划与仿真研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47: 72-75.
- [3] 徐达, 陶长城. 工业机器人焊接路径规划研究与应用 [J]. 电焊机, 2020, 50(12): 37-42.
- [4] 吕文壮, 曹家勇, 党铭章, 等. 改进蚁群算法在焊接机器人路径规划中的应用 [J]. 机械设计与研究, 2019, 35(6): 32-36.
- [5] 王学武, 时应盼, 顾幸生. 基于分区粒子群算法的焊接机器人路径规划 [J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2014, 40(5): 95-101.
- [6] 王学武, 汤彬, 顾幸生. 焊接机器人避障策略研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 77-84.
- [7] 林巨广, 陈楚欣, 戴淮初, 等. 蚁群算法在白车身底板焊接路径规划中的应用 [J]. 焊接学报, 2015, 36(1): 5-9.
- [8] 王学武, 严益鑫, 顾幸生. 基于莱维飞行粒子群算法的焊接机

器人路径规划 [J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 373-377.

- [9] 姜宇, 张丽. 基于 GA 及 ROBCAD 的机器人路径规划与仿真研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(6): 105-108.
- [10] 张瑞星, 李秀娟. 基于 APG 算法的多焊接机器人路径规划研究 [J]. 机床与液压, 2018, 46(18): 144-149.
- [13] 沈健, 洪磊, 嵇保健, 等. 弧焊机器人系统的相交管路径规划 [J]. 机械设计与研究, 2017, 33(6): 40-43.
- [14] 施德超. 基于 ROBCAD 二次开发的白车身焊接机器人路径规划研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [11] 王小彤, 侯立刚, 苏成利. 一种改进的蚁群算法求解多维背包问题 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2015, 35(4): 53-57.
- [12] 晁永生, 刘海江. 白车身焊接机器人加工路径优化和仿真 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(4): 442-445.
- [15] 杨静. 基于焊装生产线节拍平衡的布局优化研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.

作者简介: 曹家勇(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师;主要研究方向为机电驱(传)动技术、智能测控技术等,已发表论文 30 余篇。