

文章编号: 1671-0444(2018)04-0508-05

微创手术钳柔顺拓扑优化设计

赵爽^{1,2}, 苗玉彬¹, 罗云¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 上海电机学院 机械学院, 上海 201306)

摘要: 传统的微创手术钳是带有运动副的刚性构件, 结构复杂且夹持力呈非线性变化, 容易造成器官组织过压损伤。基于免装配的柔顺连续体拓扑设计, 以柔性部件的整体弯曲作为目标函数, 以保持有效夹持刚度作为附加约束条件, 建立双工况优化模型。基于变密度插值模型和优化准则方法进行迭代求解, 得到较为理想的手术钳柔性拓扑结构, 并对优化后结构进行有限元数值分析。结果表明, 钳头结构末端的最大位移和夹持刚度均满足手术钳使用要求, 且具有力-位移线性响应关系。该研究简化了手术钳结构, 有利于改善操作手感和夹持效果, 为拓展柔顺机构在微创手术临床实践中的应用提供了思路。

关键词: 微创手术钳; 柔顺机构; 拓扑优化; 变密度插值; 夹持刚度

中图分类号: R 318

文献标志码: A

Compliant Topology Optimization Design of Minimally Invasive Surgical Grasper

ZHAO Shuang^{1,2}, MIAO Yubin¹, LUO Yun¹

(1. School of mechanical engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. School of mechanical engineering, Shanghai Dian Ji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The traditional minimally invasive surgical grasper is a rigid component with a joint, and its structure is complex as well as the non-linear clamping force, easily leading to over-pressure injury. Based on the assembly-free compliant continuum topology design, the overall bending of the flexible components was taken as the objective function, and the maintained effective clamping stiffness as an additional constraint to establish a double-duty optimization model. The model was iterated based on the variable density interpolation model and optimization criteria method, a more ideal surgical clamp flexible topology was obtained. Then the finite element analysis was made to analyze the optimized structure. The results show that the maximal displacement and the clamping stiffness of the clamp head meet the requirements of the grasper and have a force-displacement linear response. This study simplifies the structure of the grasper which is beneficial to improve the operation feeling and clamping effect, and provide ideas for expanding the application of compliant mechanism in the clinical practice of minimally invasive surgery.

Key words: minimally invasive surgical grasper; compliant mechanisms; topology optimization; variable density interpolation; grasp stiffness

收稿日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075263)

作者简介: 赵爽(1973—), 女, 山东菏泽人, 硕士, 副教授, 研究方向为微创手术器械, E-mail: zhaos@sdju.edu.cn

手术钳是微创手术中非常重要的夹持工具。手术过程中医生通过长杆手术钳实现对人体组织的抓取、分离、移位、牵引等操作^[1]。由于钳头夹持部位的压力和操作力之间存在非线性比例关系,从而影响了医生对器械的操作精度,使得医生无法准确感知实际夹持力的大小,难以满足手术钳与人体组织界面间“夹而不滑”、“持而不伤”的要求,极易造成组织的过压损伤。此外,微创手术钳本质上是由铰链和连杆等刚性构件依靠运动副连接而成的传统机械结构^[2],存在着运动副引起的摩擦、磨损和间隙以及机械结构决定的加工和安装误差等问题。随着技术的发展,微创手术器械越来越精密化,传统刚性结构除了在尺寸上难以满足要求外,其复杂的机构组成带来的制造、装配以及消毒成本都变得更高^[3]。

为实现对患者组织的无损伤有效夹持,需要对手术钳的设计和力传递特性等基础问题进行分析研究。给腹腔镜钳加装可实现柔性夹持的钳头来减小最大应力^[4];在止血钳的夹持部位加装压力可控的医疗气球以控制止血钳的夹持压强^[5];在内窥镜钳的夹持内表面集成超微型触感传感器阵列,来检测手术钳施加在病人脏器表面的夹持压强^[6]。Zhao等^[7]基于渐开线特征设计了具有渐开线导向槽的新型手术钳头,使医生的握持力与手术钳头的夹持力形成线性比例关系。上述研究改善了手术钳的操作手感和夹持效果,但也使得钳头结构变得更为复杂,对器械可靠性、可消毒性和使用稳定性都带来了不利影响。

柔顺机构是以柔顺元件弹性变形实现运动传递、能量转换的免装配机构^[8]。与传统刚性机构相比,柔顺机构采用一体化制造技术,无装配、无铰链且不依靠运动副来实现所需的功能,因而可以大大减少构件数目,制造和消毒程序非常简单,成为研究微创手术器械的理想选择。柔顺机构一般可采用伪刚体法或拓扑优化方法进行设计,如文献^[9]综合考虑结构互势能和应变能对优化结果的影响后,将拓扑优化方法应用于柔性机构的设计中。文献^[10]基于变密度法的柔性夹钳数学模型对设计区域进行了结构拓扑优化,设计了一种两端夹持力输入的免装配柔性夹钳。

本文围绕微创手术钳的柔顺设计问题,基于SIMP(solid isotropic material with penalization)密度-刚度插值模型研究钳体的结构拓扑形式,并优化其力-位移的输入、输出响应特性,从而得到设计域内最优布局形式的钳体构型。

1 基于 SIMP 的柔顺拓扑优化插值模型

拓扑优化根据给定的负载、约束和性能指标,在设计区域内对材料分布进行优化,使结构能够在满足应力、位移等约束条件下,具有优化的力-位移输入、输出关系,或者使刚度等性能指标达到最优。求解时一般采用基于密度-刚度插值模型的优化方法,如 SIMP 模型和 RAMP(rational approximation of material properties)模型等^[11]。SIMP 插值模型对中间密度的惩罚效果优于 RAMP 插值模型,且易于编程实现,实际应用较多。对于以最小柔度为目标函数,材料体积为约束条件以及结构单元相对密度为设计变量的连续体结构拓扑优化问题,基于 SIMP 方法的优化模型可表示为式(1)^[12]。

$$\begin{aligned} \text{Find: } & \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_e\}^T \in \Omega, e = 1, \dots, N \\ \text{Minimize: } & C = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e = \sum_{e=1}^N (x_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_e \\ \text{Subject to: } & V = \rho V_0 = \sum_{e=1}^N x_e v_e \leq V^* \\ & 0 < x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} \leq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: Ω 为设计域; C 为结构柔度; \mathbf{U} 为位移阵; \mathbf{K} 为总刚度阵; V_0 、 V 分别为初始体积和优化后体积; ρ 为体积比; \mathbf{u}_e 和 \mathbf{k}_e 分别为单元位移阵和单元刚度阵; \mathbf{k}_0 为初始单元刚度阵; v_e 为单元体积; N 为离散单元总数; x_{\max} 和 x_{\min} (通常取 0.01~0.001) 分别为单元最大、最小相对密度值; p 为惩罚权因子。

式(1)所示的模型可以基于优化求解的数值算法如优化准则法(OC)、数学规划算法等进行迭代求解。在 SIMP 材料插值模式基础上,基于 OC 的拓扑优化求解过程如下:

(1) 定义设计区域(即基结构)、非设计区域,定义边界条件。设计域内单元相对密度 $x_e \in [0, 1]$, 非设计区域单元相对密度通常固定为 0 或 1, 其中 0 代表空白区域, 1 代表实体区域。

(2) 定义材料属性,进行有限元初始化和设计变量初始化。

(3) 进行有限元求解,求取单元和结构刚度阵、位移阵;计算目标函数和约束函数值,并求解目标函数和约束函数导数(即灵敏度)。

(4) 利用 OC 迭代更新设计变量值,求解迭代拉格朗日乘子。

(5) 检验计算结果的收敛性,如未收敛则转步骤(3)循环迭代,如收敛转步骤(6)。

(6) 输出目标函数值及设计变量值,产生结构最优拓扑形式,结束计算。

其中,步骤(3)中插值模型的刚度矩阵、柔度函数和灵敏度函数如式(2)所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= \sum_{e=1}^N (E_{\min} + x_e^p \Delta E) \mathbf{k}_e \\ C(x) &= \sum_{e=1}^N (E_{\min} + x_e^p \Delta E) \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \\ C'(x) &= - \sum_{e=1}^N p x_e^{p-1} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \Delta E \end{aligned} \quad (2)$$

式中: C' 为灵敏度; E_{\min} 为插值后的弹性模量; ΔE 为初始弹性模量 E_0 与 E_{\min} 的差值,一般 $E_{\min} = E_0/1\ 000$ 。

步骤(5)的收敛性检查可以取两次邻近设计变量的最大分量,根据 $\left| \frac{\max(x_{k+1}) - \max(x_k)}{\max(x_k)} \right| < \epsilon$ 确定是否收敛,或者利用两次邻近设计目标函数的绝对差值 $\left| \frac{C_{k+1} - C_k}{C_k} \right| < \epsilon$ 作为停止迭代的评判标准。

2 手术钳拓扑优化设计

临床常用的微创内镜手术钳结构如图 1 所示。医生操作手术钳手柄并使其做相向运动,将作用力通过刚性连杆传递到钳头,再由铰链构成的转动副带动钳头实现对血管或组织的夹持。



图 1 典型微创手术钳的外形

Fig. 1 Shape of typical minimally invasive surgical grasper

图 2 是钳头处的结构示意图,属于典型的刚性机械结构,其输入端连杆移动范围为 R_i , 输出端钳头开合移动范围为 R_y 。当输入端施加力 f_i 时,钳头夹持力 f_y 发生相应变化。与刚性夹钳相比,柔顺夹钳夹持范围的变化是夹钳与物体接触过程中持续变形导致的结果,其输入力比刚性夹钳更容易控制。但是柔顺变形需抵抗应变能,因此要额外消耗更多

的能量。为了尽量以最小的能量消耗完成柔顺夹钳的操作变形,应综合考虑夹钳柔度和刚性的平衡,对夹钳形状进行拓扑优化设计。

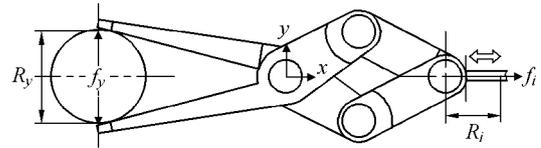
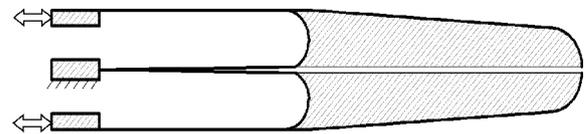


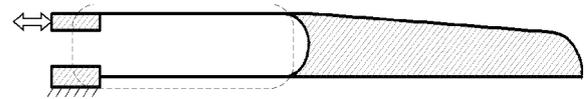
图 2 钳头的刚性结构

Fig. 2 Rigid structure of surgical grasper head

图 3 为柔顺夹钳较有代表性的一种结构类型^[13]。图 3(a)所示为柔顺夹钳处于夹紧位置时的形态,夹钳由平行的“板簧”结构组成,其左侧上下两端固定,通过中间部分的左右移动,实现右侧钳头的弯曲变形,形成夹钳的开闭变化。图 3(b)是处于夹紧位置时柔顺夹钳的一半。其中:右侧阴影区为了形成对组织的有效夹持,需要保持足够的刚性;中间虚线框内是钳头变形的主要部位,将通过拓扑优化对其几何形状进行优化处理。



(a) 处于夹紧状态的夹钳



(b) 设计模型



(c) 简化后的设计域

图 3 柔顺夹钳结构形式

Fig. 3 Structure of compliant gripper head

与一般结构的拓扑优化不同,对微创手术夹钳而言,不能简单地如式(1)所示以柔度最小作为优化目标。为了保证实现夹钳的有效功能,拓扑设计时还应考虑以下要求:

(1) 整体外形直径保持在 5~15 mm,夹钳末端在垂直方向上的位移应为 5 mm 左右,从而使夹钳总体开口宽度达到 10 mm 左右,与临床所用夹钳保持一致。

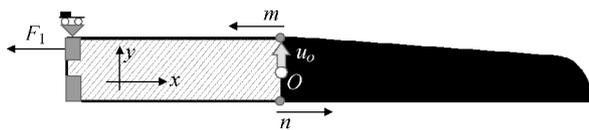
(2) 柔顺设计应该保证单元间有足够的连接刚

度,避免单元间形成点接触互连,防止断裂。

(3) 夹钳弯曲变形应基于弯曲段结构的整体变化实现,防止局部产生塑形变形或强非线性变形。

(4) 夹钳应该具有足够的变形刚度,保证对组织的有效夹持。

图 3(c)是图 3(b)简化后形成的设计域(图中网格化阴影部分),右侧黑色区为刚性保持区域。对图 3(c)所示图形建立如图 4 所示的带有约束和负载的优化设计模型。材料选用 45 Gr,其弹性模量为 1.93×10^5 MPa,泊松比为 0.3,阴影区域的目标体积比取 $\theta = 0.3$ 。系统的坐标方向、施加的载荷约束等如图 4(a)所示。图 4(a)中集中载荷 F_1 施加在左上角,按照文献[14]给出的血管断裂强度和组织损伤夹持力范围,取 $F_1 = -50$ N,同时左上角施加竖直移动约束,左下角则施加全部约束。为了确保右侧黑色实心区域的刚度满足 $100 \text{ N/mm} \leq k \leq 200 \text{ N/mm}$ 的期望范围,增加第二种工况约束,如图 4(b)所示。其中,左侧上下两端均施加全部约束,集中载荷 $F_2 = 50$ N 作用在右侧 q 点处(夹持外缘),限定 F_2 引起的竖直偏转 $u_k = 0.3$ mm,此时刚度 $k = 167 \text{ N/mm}$ 。



(a) 第一种工况下的载荷及约束



(b) 第二种工况下的载荷及约束

图 4 手术夹钳的拓扑优化设计模型

Fig. 4 Topology optimization model of surgical gripper

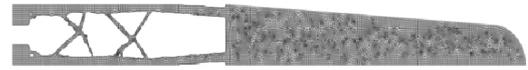
对图 4 所示力学模型建立拓扑优化模型。为使 F_1 作用到夹钳后夹钳偏转的角度最大,修改式(1),建立如式(3)所示的优化模型。

$$\begin{aligned}
 &\text{Find: } \mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_e\}^T \in \Omega, e = 1, \dots, N \\
 &\text{Minimize: } u_m - u_n \\
 &\text{Subject to: } V = \sum_{e=1}^N x_e v_e \leq V^* \\
 &\quad u_q \leq 0.3 \\
 &\quad 0 < x_{\min} \leq x_e \leq x_{\max} \leq 1 \quad (3)
 \end{aligned}$$

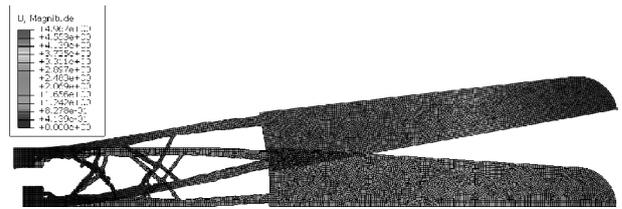
式中: u_m 、 u_n 分别为点 m 、 n 在水平方向上的位移;

u_q 为 q 点在竖直方向上的位移,其余各变量含义同式(1)。

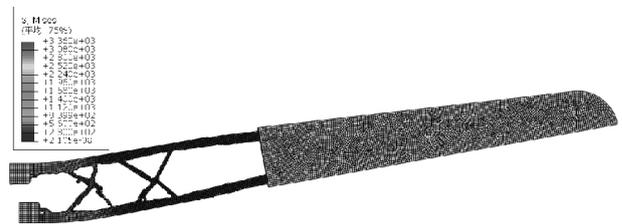
对式(3)所示模型进行优化处理,经 50 次迭代循环后其拓扑优化结果如图 5(a)所示。图 5(a)表明本文模型及方法可以获得清晰合理的优化结构。



(a) 拓扑优化结果



(b) 优化后的钳头位移云图



(c) 优化后的钳头应力云图

图 5 手术夹钳的拓扑优化结果

Fig. 5 Topological optimization results of surgical gripper

图 5(a)左侧为优化后弯曲部分(即设计域)的几何形状,右侧为不参与优化的夹持部分,迭代停止时目标函数的值为 -0.543 mm。利用有限元软件对图 5(a)获得的结构进行计算分析,得到其变形前后的钳头位移云图如图 5(b)所示,变形后的应力云图如图 5(c)所示。可见其末端最大位移量为 4.967 mm,最大应力为 3.36 MPa,优化后夹持段在第二工况的变形为 0.288 mm,对应刚度 $k = 173.6$ N/mm,和预期的设计范围吻合,且弯曲部分变形呈现较好的整体性。

计算得到的结构优化后钳头的力-位移响应曲线如图 6 所示。由图 6 中曲线的变化特征可见,在集中载荷的变化范围内,结构的力-位移响应呈良好的线性比例关系,这将有利于手术过程中医生对夹持力的感知和控制。

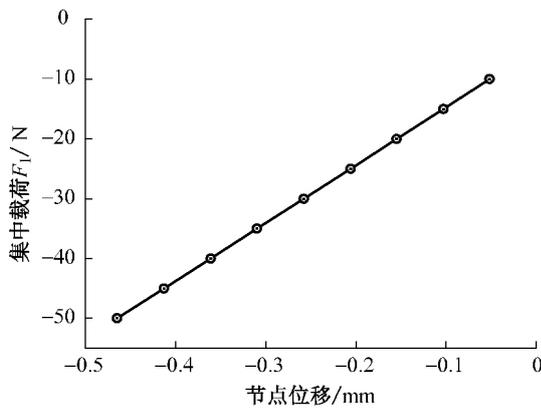


图 6 优化后的钳头力-位移响应曲线图

Fig. 6 The optimized force/displacement response curve of the grasper head

3 结 语

微创手术对器械的精密性、操作的有效性要求较高,现有的刚性结构手术钳存在非线性操作力、结构复杂、消毒困难等不足,容易造成人体组织的过压损伤。本文针对微创手术钳的柔顺连续体拓扑优化设计问题,从实现手术钳柔性部件的整体弯曲和有效夹持刚度两个优化目标出发,建立了双工况载荷及约束条件下的数学模型,并基于 SIMP 插值模型和优化准则方法进行迭代求解,得到了较为理想的钳头拓扑结构形式。优化结构的有限元分析表明,本文方法获取的钳头结构末端最大位移为 4.967 mm,钳头刚度为 173.6 N/mm,满足手术钳的使用要求,且钳头具有线性的力-位移响应关系,方便控制夹持力,有利于改善手术钳的操作手感和夹持效果。优化后的手术钳简单紧凑,不存在摩擦且不需要润滑,为拓展柔顺机构在微创手术临床实践中的应用提供了新途径。

参 考 文 献

[1] YUICHI K, TOSHIO T, TOMOHIRO K, et al. Force-based automatic classification of basic manipulations with grasping

forceps[J]. International Journal of Life Science and Medical Research, 2013, 4(2): 75-81.

- [2] SWANSTROM L L, WHITEFORD M, KHANJANCHEE Y. Developing essential tools to enable transgastric surgery [J]. Surgical Endoscopy, 2008, 22(3): 600-604.
- [3] 苏长胜. 新型医用柔顺微夹钳的设计与优化[D]. 广州: 广东工业大学机电工程学院, 2014.
- [4] MARUCCI D D, CARTMILL J A, MARTIN C J, et al. A compliant tip reduces the peak pressure of laparoscopic graspers [J]. ANZ Journal of Surgery, 2002, 72(7): 476-478.
- [5] TAKAKI T, OMASA Y, ISHII I, et al. Force visualization mechanism using a moiré fringe applied to endoscopic surgical instruments [C]// 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2010: 3648-3653.
- [6] SOKHANVAR S, PACKIRISAMY M, DARGAHI J. A multifunctional PVDF-based tactile sensor for minimally invasive surgery [J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(4): 989-998.
- [7] ZHAO S, LUO Y, WANG M, H. Design of an SMA embedded clamps for endoscopic surgery [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33(3): 973-978.
- [8] 张守银. 柔顺机构的软化和静态平衡设计[D]. 西安: 西安电子科技大学机电工程学院, 2012.
- [9] KIM T S, KIM Y Y. Multi-objective topology optimization of a beam under torsion and distortion [J]. AIAA Journal, 2002, 40(2): 376-381.
- [10] 侯宇, 郭艳霞, 罗洁, 等. 免装配柔性夹钳的变密度法结构设计 [J]. 机械设计与制造, 2015(11): 131-135.
- [11] 刘文涛, 李雪清, 孙志宏, 等. 基于震动力平衡及应力约束的柔顺机构拓扑优化设计[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(6): 790-796.
- [12] 左孔天, 陈立平, 钟毅芳, 等. 基于人工材料密度的新型拓扑优化理论和算法研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(12): 31-37.
- [13] HOETMER K, WOO G, KIM C, et al. Negative stiffness building blocks for statically balanced compliant mechanisms: Design and testing [J]. ASME Journal of Mechanisms and Robotics, 2010, 2(4): 1-9.
- [14] 林婧, 籍晓萍, 王璐. 管状人造血管拉伸夹持件的设计和应用 [J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(2): 14-16.

(责任编辑: 杜 佳)