

微细线控变路径穿刺针设计与验证

王冠斌^{1,2}, 孙椰望¹, 高鹏凯¹, 杨鲁伟¹

(1. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘要:目的 提出一种协作机器人基体+线控微细变路径机器人末端执行系统耦合的精准微细微创机器人系统, 设计了包含外针的刚性体、内针的非均匀柔性体、力控线、像纤内部成像等部件的穿刺进针结构, 验证此系统的可行性。方法 通过搭建穿刺机器人穿刺进针结构实物, 对影响变路径精准穿刺针关键部件进行结构优化设计分析, 基于正交实验设计方法设计主要影响穿刺针精准性的孔中心距边缘起始距离、开孔直径、两孔之间距离3因素3水平实验, 并结合实物进行实验验证与仿真。结果 记忆合金变路径穿刺针尖端位移量与孔中心距边缘的起始距离关系较大, 影响的主次因素为孔中心距边缘起始距离>孔开口>孔距。当孔中心距边缘起始距离为1 mm、开孔直径为0.2 mm、两孔之间距离为2.6 mm时, 穿刺针尖端位移量取最大值。结论 实验验证了设计系统的功能适用性和变路径穿刺的线弹性滞后特性, 为进一步活体实验和系统优化提供借鉴。

关键词: 变路径穿刺; 机器人; 结构设计; 优化试验

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.05.027

Structural Design and Experiment of Micro-Wire Control Variable Path Puncture Needle

WANG Guanbin^{1,2}, SUN Yewang¹, GAO Pengkai¹, YANG Luwei¹

(1. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 101408, China)

Abstract: Objective A precise minimally invasive robot system coupled with a cooperative robot matrix and an end effector of a wire-controlled microvariable path robot was proposed. A puncture needle structure, including the rigid body of the outer needle, non-uniform flexible body of the inner needle, force control wire, internal imaging of the image fiber, and other components, was designed to verify the feasibility of this system. **Methods** By constructing the puncture structure of the puncture robot, the structural optimization design of the key components affecting the variable-path precision puncture needle was analyzed by constructing the puncture structure of a puncture robot. Based on the orthogonal experimental design method, a three-factor and three-level experiment that primarily affected the accuracy of the puncture needle was designed, namely, the starting distance of the hole center from the edge, the diameter of the hole, and the distance between the two holes. The experiment was verified and simulated using a real object. **Results** The displacement of the titanium-nickel needle tip had a significant relationship with the starting distance of the hole center from the edge, and the main and secondary influencing factors were as follows: starting distance of the hole center from the edge > hole diameter > hole distance. When the starting distance of the hole center from the edge was 1 mm, the diameter of the hole was 0.2 mm, and the distance between the two holes was 2.6 mm, the displacement of the titanium-nickel needle tip was the maximum value. **Conclusions** The experiment verified the functional applicability of the designed system and the linear elastic hysteresis characteristics of variable path puncture, providing a reference for further *in vivo*

收稿日期:2024-04-20; 修回日期:2024-05-14

基金项目:北京市自然科学基金面上项目(3232017), 中国科学院低温工程重点实验室青年科技创新项目(CRYOQN202107), 国家智能机器人重大专项(2019YFB1310905)

通信作者:孙椰望, 高级工程师, E-mail: sun_yewang@126.com

experiments and system optimization.

Key words: variable path puncture; robot; structural design; optimized experiment

微创精准性过度依赖于经验丰富的医生,穿刺手术重点、难点在于穿刺精度的把握^[1-3]。国内目前以直针穿刺为主,刚性针在骨骼组织等刚性组织中穿刺进给时,因骨骼组织有一定的强度,刚性针强度也比较高,在穿刺进入骨骼组织后,两者都不会变形,方向基本没有变化^[4-8]。但当刚性针在软组织中穿刺时,会有两种结果:① 针穿刺进入软组织后,软组织受力发生形变,病灶位置会发生偏移;② 针穿刺进入后,针和软组织受到摩擦力等不均匀的力,使穿刺产生较大的误差,微小变化会导致规划好路径的手术失败,因此需要重复穿刺过程,给患者重复造成伤害,大大加剧了患者的病痛和医务人员的工作难度,急需一种具备较好刚度和多自由度的变路径进针结构^[9-15]。

近年来,机器人技术迅猛发展,机器人凭借其实用性高、便利程度高、高效率、多用途、专业化等特点,在众多领域都发挥重要的作用^[24]。在微创尺度要求上,特别需要优于 3 mm 直径的超微细可控穿刺结构,进行精度可控、路径可控、结构微细的

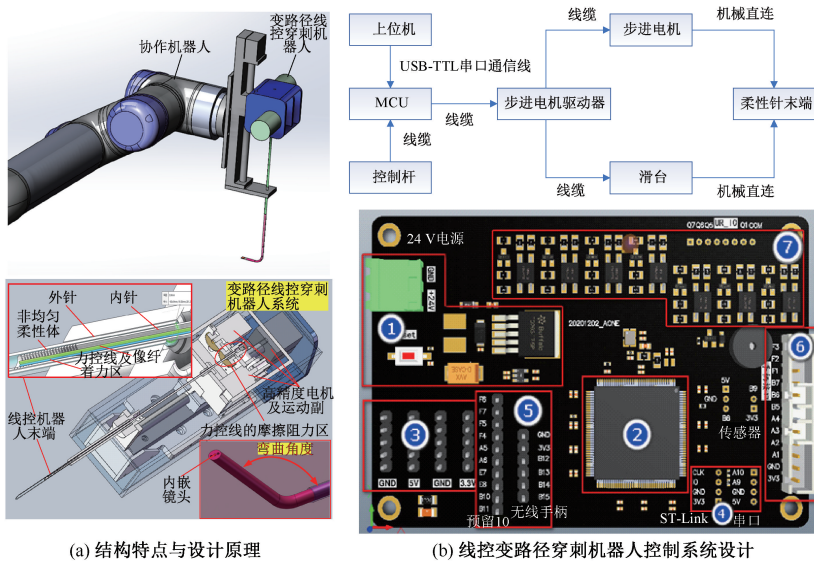
创穿刺机器人结构系统创新设计。变路径可控穿刺系统可以较好弥补刚性穿刺的弊端,实现穿刺针在人体复杂病变体路径的适应性调整,从而顺利精准到达病灶所在位置^[16-20]。特别是记忆合金穿刺针具备较好的可控线弹性材料力学特性,促进解决位姿变动精准控制的难题^[21-23]。本文重点设计分析宏微结构耦合的微细变路径穿刺机器人结构系统,并进行关键穿刺部件结构优化设计分析。

1 线控机器人结构设计

随着机器人技术在现代医疗领域的广泛应用,人类对于疾病治疗的手段也因此得到显著提高,各类用于辅助医生体检、手术以及护理的机器人发展迅速^[25]。线控穿刺机器人系统主要由协作机器人作为载荷支撑平台,具体和核心部件系统主要由驱动力部分和穿刺部件组成,为了实现精准力矩控制,按照精密直线运动副直接驱动穿刺针的穿刺进给和弯曲变轨。

1.1 变路径模组驱动穿刺机器人结构设计原理

如图 1(a)所示,高精度电机运动模组通过齿轮



(a) 结构特点与设计原理

(b) 线控变路径穿刺机器人控制系统设计

图 1 线控变路径穿刺机器人关键结构设计与控制原理

Fig. 1 Design and control principle of key structure of linear variable path piercing robot (a) Mechanism of the structural design, (b) Control system design of the variable path puncture robot

注:图 1(b)中,① 直流可调降压稳压电源模块,② 微控芯片,③ 外部设备供电部分,④ 微控芯片程序和串行数据通信接口,⑤ 微控单元 IO 和无线接收器接口,⑥ 手柄有线接口,⑦ 协作机器人控制柜的 IO 接口。

传递和绕线回转轴实现线控变路径进针功能,穿刺进针结构主要包含外针的刚性体、内针的非均匀柔性体、力控线、像纤内部成像等部件。特别是力控线和穿刺针都采用了记忆合金材质,能够较好实现变路径自动线性回弹,保障了较准确的穿刺系统位置控制。其中,直接影响穿刺过程变形轨迹的内针结构设计成为核心的变路径穿刺精准实现部件。

图1(b)所示为系统控制逻辑及关键集成控制设计。通过术前上位机人机交互界面设置进针机械手运动参数,操作控制杆发出控制指令,采集控制杆的信号,MCU判断是否有穿刺针、弯曲针、旋转针的指令,处理数据发送数字脉冲信号至步进电机驱动器,驱动器生成数字脉冲控制滑台步进电机和进针步进电机,进针机械手开始运动,从而实现多自由度变路径进针的操作。

1.2 关键部件设计

为了进一步实现较好的变路径穿刺进针控制,必须对记忆合金穿刺针进行优化设计分析。采用在直径2.3 mm、壁厚0.2 mm合金管上开槽的方式实现柔性针的弯曲。在柔性针尖端处开孔将丝固定在如图2所示的固定位置,通过电机的旋转拉紧丝产生拉力 F ,使合金穿刺针发生弯曲。在对合金管进行大量弯曲实验后,发现合适的加工尺寸对合金穿刺针尖端位移量有较大的影响。其中,影响合金穿刺针尖端位移量的主要因素为开孔直径 d 、两孔之间的距离 L_1 、孔中心距边缘的起始距离 L_2 。为此,采用基于正交实验设计方法,设计了主要影响合金穿刺针尖端位移量的3因素3水平共9组实验,并验证实验的准确性。

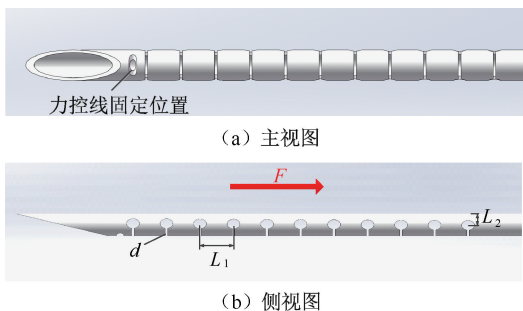


图2 记忆合金穿刺针结构设计原理

Fig. 2 Structural design principle of memory alloy puncture needle (a) Main view, (b) Side view

注: d 为开孔直径, L_1 为两孔之间的距离, L_2 为孔中心距边缘的起始距离。

2 优化分析

2.1 实验平台

9根长250 mm、外径2 mm、壁厚0.2 mm柔性针,高强度丝,机器人控制系统。将加工好的记忆合金穿刺针固定到进针机器人中,通过操控手柄实现进针机器人控制记忆合金穿刺针的弯曲,在记忆合金穿刺针尖端放置有力传感器,传感器所受的力会实时传输给计算机并通过显示器显示出来(见图3)。

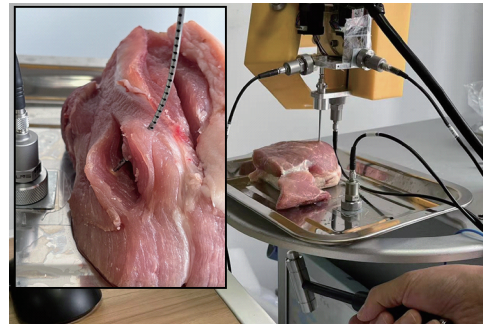


图3 记忆合金穿刺针弯曲实验平台及穿刺实验平台

Fig. 3 Memory alloy puncture needle bending experimental platform and puncture experimental platform

2.2 正交试验设计

将开孔直径 d 、两孔之间距离 L_1 、孔中心距边缘的起始距离 L_2 作为影响记忆合金穿刺针尖端位移量的主要因素,各取3水平放进3因素3水平正交表中(见表1)。根据正交实验表,对实验进行排序。结果表明,需进行9次弯曲实验。每次实验完成后,对柔性针尖端位移量进行测量并记录。

表1 各影响因素的水平值

Tab. 1 Level values of each influencing factor

因素	1水平	2水平	3水平
L_2/mm	1.0	1.1	1.2
d/mm	0.2	0.25	0.3
L_1/mm	2.2	2.4	2.6

为保证实验的准确性,使用Simulation对记忆合金穿刺针做有限元分析,将记忆合金穿刺针尖端部进行固定,在记忆合金穿刺针的尖端处统一施加2 N力,力的方向沿记忆合金穿刺针尖端切线方向。分析结果表明,在2 N外力作用下,记忆合金穿刺针尖端产生最大的位移为15.91 mm(见图4)。

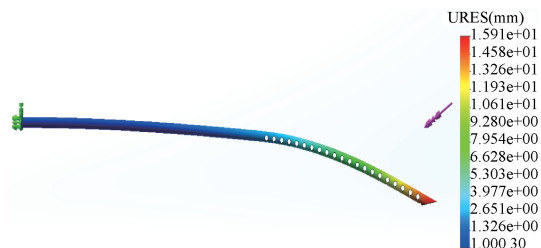


图4 柔性针有限元受力分析位移变化

Fig. 4 Finite element force analysis of flexible needle displacement change

3 数据处理

将步进电动机施加在记忆合金穿刺针上的力控制在 2 N,依次进行 9 组记忆合金穿刺针样本实验并记录(见表 2)。

表 2 正交实验设计和实验数据

Tab. 2 Orthogonal experimental design

序号	1 水平	2 水平	3 水平	尖端位移量/mm
	L_2 /mm	d /mm	L_1 /mm	
1	1.0	0.2	2.2	15.91
2	1.0	0.25	2.4	14.30
3	1.0	0.3	2.6	19.71
4	1.1	0.2	2.4	14.3
5	1.1	0.25	2.6	15.72
6	1.1	0.3	2.2	12.94
7	1.2	0.2	2.6	12.91
8	1.2	0.25	2.2	11.05
9	1.2	0.3	2.4	11.99

记忆合金穿刺针自然状态下时尖端位移为 l_0 ;在记忆合金穿刺针上施加 2 N 力后,尖端弯曲并记录此时尖端的位置,测量此时尖端的横向距离,记为 l_1 ,则有

$$\text{尖端位移量} = l_1 - l_0 \quad (1)$$

4 讨论

本文提出了基于协作机器人基体+线控微细变路径机器人末端执行系统耦合的精准微细微创机器人系统,设计了包含外针的刚性体、内针的非均匀柔性体、力控线、像纤内部成像等部件的穿刺进针结构,验证了此系统的可行性。

运用折线图将 9 组实验结果绘制出来,可以看出,尖端位移长度与孔中心到边缘的起始距离和两孔之间的距离呈负相关。随着孔中心到边缘起始

距离的增加,记忆合金穿刺针尖端位移逐渐减小。开孔直径对尖端位移量的影响较小。其中,在第 3 组试验, $L_2 = 1 \text{ mm}$ 、 $d = 0.3 \text{ mm}$ 、 $L_1 = 2.6 \text{ mm}$ 时,记忆合金穿刺针尖端位移量取最大值 19.71 mm。在第 8 组试验, $L_2 = 1.2 \text{ mm}$ 、 $d = 0.25 \text{ mm}$ 、 $L_1 = 2.2 \text{ mm}$ 时,记忆合金穿刺针尖端位移量取最小值 11.05 mm (见图 5)。

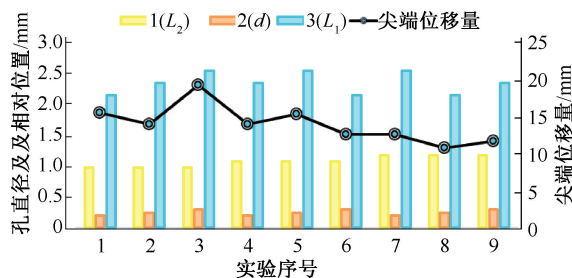


图 5 最大、最小尖端位移量

Fig. 5 Maximum and minimum tip displacement

4.1 极差分析

极差 R 反映了该因素对试验指标的影响程度。极差越大,表明因素对试验指标影响越大;反之越小。记尖端位移量最大、最小值分别为 l_{\max} 、 l_{\min} ,则有

$$R = l_{\max} - l_{\min} \quad (2)$$

比较各因素所对应水平的尖端位移量,将最大值与最小值代入式(2)计算极差 R 。由实验数据可知,孔中心到边缘的距离 L_2 的极差最大值为 4.66,因此,其对记忆合金穿刺针尖端偏移量的影响最大。从数据可以看出,影响记忆合金穿刺针弯曲的主次因素依次为 $L_2 > d > L_1$ 。

4.2 平均值分析

将实验得出的各因素各水平的记忆合金穿刺针尖端位移量累加并求平均值,通过比较各水平的平均值可以找出最优水平。经计算可知, $L_2 = 1 \text{ mm}$ 时,尖端位移量的均值最大取最优水平。 $d = 0.2 \text{ mm}$ 时,尖端位移量均值最大取最优水平。 $L_1 = 2.6 \text{ mm}$ 时,尖端位移量均值最大取最优水平。综上所述,因素 L_2 、 d 、 L_1 的最优水平为 $L_{2(1)}$ 、 $d_{(1)}$ 、 $L_{1(3)}$,即选择孔中心距边缘起始距离 1 mm、开孔直径 0.2 mm、两孔之间距离 2.6 mm 时,记忆合金穿刺针尖端位移量最大。

4.3 方差分析

由于极差分析只能反映各因素对实验指标影

响的相对大小,不能够准确反映出各因素对实验的影响是否显著,而通过方差分析可以解决因素对试验结果影响是否显著的问题^[14]。因此,对记忆合金穿刺针尖端位移量进行方差分析,确定 L_2 、 d 和 L_1 这3个因素对记忆合金穿刺针尖端位移量所产生的影响显著性。根据其影响,点对点控制该因素的工艺水平,以达到精确控制记忆合金穿刺针尖端位移量的作用。

基于正交实验方差分析方法和记忆合金穿刺针尖端位移量数据,计算各因素的偏差平方和、自由度、方差估计值和方差比(F 值)。从方差分析的结果来看,孔中心距边缘的起始距离(L_2)对记忆合金穿刺针尖端位移量的影响具有显著性。因此,在实际的加工过程中,应将 L_2 参数作为关键因素并进行严格的控制,从而使记忆合金穿刺针尖端位移量达到最大值。

同时,本文发现, L_2 对应的 F 值为15.25,该值大于 $F_{0.1}(2,2)$ 而小于 $F_{0.05}(2,2)$ 。因此,当显著性水平 $\alpha=0.1$ (置信度为90%)时,该因素对记忆合金穿刺针尖端位移具有显著影响。 d 和 L_1 所对应的 F 值分别为2.09、1.00,它们未达到 $\alpha=0.1$ (置信度为90%),因此, d 和 L_1 对记忆合金穿刺针尖端的位移量产生的影响较小(见表3)。

表3 影响记忆合金穿刺针尖端位移因素方差分析

Tab. 3 Variance analysis of factors affecting tip displacement of memory alloy piercing needle

统计指标	L_2	d	L_1
偏差平方和	10.857 9	1.484 5	0.711 8
自由度	2	2	2
方差估计值	5.428 95	0.742 25	0.355 90
F	15.25	2.09	1
$F_{0.1}(2,2)$	9	9	9
$F_{0.05}(2,2)$	19	19	19
显著性	显著	不显著	不显著

4.4 实验验证

针对上述分析,选用优化设计参数值($L_2=1.2$ mm, $d=0.25$ mm, $L_1=2.2$ mm)进行变路径穿刺针加工。功能实验结果显示,满足肌肉穿刺的基本要求;同时,对试验过程的动态特性进行检测,发现存在变路径进针过程存在的穿刺冲击和响应的线弹性滞后(见图6)。研究结果为下一步活体实验提供借鉴。

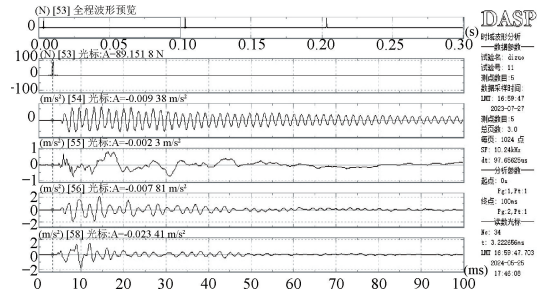


图6 动态穿刺过程的变路径穿刺实验

Fig. 6 Variable path puncture experiment of dynamic puncture process

5 结论

(1) 采用协作宏观运动+线控高精度进针运动的机器人系统,能够较好地实现高效精准变路径穿刺过程。

(2) 孔中心距边缘的起始距离取1 mm时,尖端位移量的均值最大取最优水平;开孔直径取0.2 mm时,尖端位移量均值最大取最优水平;两孔之间的距离取2.6 mm时,尖端位移量均值最大取最优水平。即最优水平为 $L_{2(1)}$ 、 $d_{(1)}$ 、 $L_{1(3)}$ 。

(3) 影响记忆合金穿刺针尖端位移量因素的顺序为:孔中心距边缘的起始距离>孔开口>孔距。孔中心距边缘的起始距离对记忆合金穿刺针尖端位移量的影响最大。

(4) 离体肌肉实验验证了结构系统设计的变路径穿刺功能适用性,并揭示了变路径穿刺的线弹性滞后特性。

(5) 本研究为镂空式线控穿刺变路径机器人结构的优化设计提供借鉴,并为进一步活体穿刺实验提供了基础参考。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:王冠斌整理文献、设计论文框架、撰写论文;孙椰望提出选题、研究实验方案、审定论文;高鹏凯协助整理数据、试验统计分析;杨鲁伟指导论文写作、提供工作支持。

参考文献:

- [1] 田伟. 我国医用机器人的研究现状及展望[J]. 骨科临床与研究杂志 2018(4): 3193-197.
- [2] 刘宇行, 孙椰望, 蒋建虎, 等. 腰椎神经微创机器人柔性进针控制技术设计[J]. 颈腰痛杂志, 2021, 42(2): 274-276.
- [3] 梁新强, 刘亚虎. 微创神经外科的发展现状[J]. 微创医学,

- 2016, 11(5): 661-663.
- [4] 宿志亮. 柔性针穿刺软组织的力学建模及变形测量[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [5] 王田苗, 张大朋, 刘达. 医用机器人的发展方向[J]. 中国医疗器械杂志, 2008(4): 235-238.
- [6] 王树新, 王晓菲, 张建勋, 等. 辅助腹腔微创手术的新型机器人“妙手A”[J]. 机器人技术与应用, 2011(4): 17-21.
- [7] 丁钰沅. 微创外科手术机器人关键技术与研究现状综述[J]. 机械工程师, 2011(2): 45-47.
- [8] 吴洁, 周瑞强, 霍仕武, 主编. 机械设计基础课程设计[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 2018.
- [9] SAKES A, ALI A, JANJIC J, *et al.* Novel miniature tip design for enhancing dexterity in minimally invasive surgery [J]. *J Med Devices*, 2018, 12(3): 035002.
- [10] 戴建生, 魏国武, 李建民. 国际微创手术机器人的现状和发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2011(4): 1-5.
- [11] 赵亮, 赵智远, 朱德勇, 等. 用于微创外科的线驱动连续型手术机器人设计与仿真研究[J]. 机电工程, 2020, 37(4): 451-455.
- [12] 苏满佳, 张逸鸿, 谢荣臻, 等. 连续软体机器人的结构范型与形态复现[J]. 机器人, 2018, 40(5): 640-647.
- [13] 徐森鑫, 李小宁, 郭钟华. 新型柔性夹持装置软体手指的数学模型研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(5): 99-102.
- [14] 兰天. 多指仿人机器人灵巧手的同步控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [15] 王成军, 李帅. 软体机器人研究现状[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(12): 948-955.
- [16] 张学军, 唐思熠, 肇恒跃, 等. 3D 打印技术研究现状和关键技术[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 122-128.
- [17] 尹顺禹, 许艺, 岑诺, 等. 软体智能机器人的系统设计与力学建模[J]. 力学进展, 2020(501): 195-220.
- [18] 段星光, 温浩, 何睿, 等. 胸腹腔经皮穿刺机器人研究进展及关键技术分析[J]. 机器人, 2021, 43(5): 567-584.
- [19] 梁科, 王树新, 刘瑞达, 等. 应用于机器人辅助微创外科手术的术前规划方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(9): 889-899.
- [20] 王树新, 郭立瑶, 李旭莹, 等. 一种丝传动柔性手术器械的运动精度检测方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(5): 449-458.
- [21] 尹玉霞, 王鲁宁, 郝树斌, 等. 医用镍钛记忆合金在微创介入领域的应用[J]. 中国医疗设备, 2019, 34(6): 153-156.
- [22] 高云亮, 缪卫东, 冯昭伟, 等. M型Ti-Ni合金血管支架的结构设计对性能的影响[J]. 稀有金属, 2017, 41(8): 936-942.
- [23] HRYNIEWICZ T, ROKICKI R. Modification of nitinol biomaterial for medical applications [J]. *World Sci News*, 2018(96): 35-58.
- [24] 丁皓, 庄逸, 阚孟菲, 等. 静脉穿刺机械臂穿刺与挑针动作 [J]. 医用生物力学, 2023, 38(2): 375-381.
DING H, ZHUANG Y, KAN MF, *et al.* Puncture and needle picking action of venipuncture manipulator [J]. *J Med Biomech*, 2023, 38(2): 375-381.
- [25] 阚孟菲, 丁皓, 丁思吉, 等. 硅胶材料穿刺力学性能的实验研究[J]. 医用生物力学, 2022, 37(1): 137-142.
KAN MF, DING H, DING SJ, *et al.* Experimental Study on puncture mechanical properties of biomimetic materials [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(1): 137-142.