

# 热因素对线控穿刺机器人精度稳定性的影响

王冠斌<sup>1,2</sup>, 孙椰望<sup>1,2</sup>, 高鹏凯<sup>1,2</sup>, 杨鲁伟<sup>1,2</sup>

(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 101408)

**摘要:** 针对变路径线控机器人微米级精度微创过程, 进行温度因素对穿刺精度的影响规律研究。采用热分析和结构力学分析融合的方法, 获得了关键穿刺针部件非均匀温度场和结构形变特性。结合正交实验分析方法, 分析了瞬态和稳态温度变化对穿刺针部件变动的影。结果表明: 23~40 °C 的瞬态和稳态温度对微米级穿刺精度影响显著, 两种温度条件的精度影响指标一致; 工艺参数 40 °C-3.1 mm-3 mm/s 的穿刺针热变形量最大为 0.012 mm, 对应的系统影响量达到 0.1 mm 左右; 另外, 基于临床穿刺工艺特点, 通过 3 因素 5 水平的方差分析和回归分析, 揭示了钛镍合金穿刺针热因素导致的非均匀热变形规律及影响穿刺精度的温度  $T$  大于穿刺针直径  $D$  和进针速度  $V$  的影响。

**关键词:** 热影响; 变路径穿刺; 精密微创; 实验分析

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)04-1225-07

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240399

## Influence of thermal factors on precision stability of wire-controlled puncture robot

WANG Guan-bin<sup>1,2</sup>, SUN Ye-wang<sup>1,2</sup>, GAO Peng-kai<sup>1,2</sup>, YANG Lu-wei<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** This article focuses on the micro invasive process of variable path wire controlled robots with micrometer precision, and studies the influence of temperature factors on puncture accuracy. By integrating thermal analysis and structural mechanics analysis, the non-uniform temperature field and structural deformation characteristics of key puncture needle components were obtained. By combining the orthogonal experimental analysis method, the influence of transient and steady-state temperature changes on the changes of puncture needle components was analyzed. The results show that the transient and steady-state temperatures from 23 °C to 40 °C have a significant impact on the precision of micrometer level puncture, and the accuracy impact indicators of the two temperature conditions are consistent: the maximum thermal deformation of the puncture needle with process parameters of 40 °C-3.1 mm-3 mm/s is 0.012 mm, and

**收稿日期:** 2024-04-15.

**基金项目:** 北京市自然科学基金项目(3232017); 中国科学院低温工程学重点实验室青年科技创新项目(CRYO-QN202107); 国家智能机器人重大专项项目(2019YFB1310905).

**作者简介:** 王冠斌(1973-), 男, 高级咨询师, 博士. 研究方向: 精密智能医工技术.

E-mail: wangguanbin20@mails.ucas.ac.cn

**通信作者:** 孙椰望(1985-), 男, 高级工程师, 博士. 研究方向: 精密智能制造与微创医工. E-mail: sun\_yewang@163.com

the corresponding system impact reaches about 0.1 mm; In addition, based on the characteristics of clinical puncture technology, a 3-factor 5-level analysis of variance and regression analysis were conducted to reveal the non-uniform thermal deformation law caused by thermal factors of titanium nickel alloy puncture needles and the influence of temperature  $T$  on puncture accuracy, which is greater than the diameter  $D$  of the puncture needle and the injection speed  $V$ .

**Key words:** thermal effect; flexible wire-controlled puncture; precision minimally invasive; experiment analysis

## 0 引言

目前,微创技术得到了广泛的发展和应用,特别是 0.5 mm 微细病变体临床诊断已经实现,微小型恶性病变体的早发现早治疗成为临床病例的迫切需求,小于 5 mm 的恶性病变体已经广泛出现在临床微创中<sup>[1-3]</sup>。特别是近年来,随着微创机器人技术的快速发展,微创行业需要的高精度、智能化微创工具成为微创临床的技术发展要求<sup>[4-6]</sup>。但是,微创系统实现毫米尺度的病变体去除,必须依靠谨慎的人机交互或高效率的亚毫米微米级进针及手术精度的机器人系统。在高精度要求的微创工具技术标准情况下,微创过程的动态负载和环境温度变化成为影响微创精度的关键因素<sup>[7,8]</sup>。因此,微创机器人系统的柔性动态补偿、恒温手术环境、穿刺过程的恒冷光源成为最基本的工况要求和条件保障。

然而,近年来的微创技术发展表明:穿刺机器人末端一次进针很难高精度实现,国家“十四五”立项提出微创机器人捕捉病变体达到 0.5 mm 精度,这个技术要求必须依靠较好的精准控制、精密结构和环境条件<sup>[9-11]</sup>。为此,采用 10  $\mu\text{m}$  运动精度的精密直线运动单元实现驱控进针部件 0.1 mm 精度进针,成为一种精密控制逻辑方案;并采用协作机器人+线控变路径可控机器人耦合的系统,高效实现破壁快速进针+靶点高精度捕捉的耦合微创工艺路线,其中量化高精度指标控制成为关键环节<sup>[12,13]</sup>。

为准确揭示微创过程主要温度条件变化对穿刺精度稳定性的影响规律,为结构优化和精准控制奠定基础,本文针对研制的钛镍合金变路径线控机器人关键穿刺部件进行温度影响精度稳定性分析。考虑高精度变路径穿刺的实验检测困难和高精度数据环境干扰的不确定性,仿真分析成为较好的方式;特别是热固耦合分

析方法能够较好解决非均匀温度场约束结构模型边界并计算分析结构形变的规律,本文主要依靠热场分析和结构力学分析融合的优化实验数值分析方法,进行变动参数的规律性研究。研究结果表明:230~400  $^{\circ}\text{C}$  范围内的瞬态和稳态温度对穿刺精度有显著影响,且两种温度条件下的精度影响一致。这表明温度因素在微创精准穿刺中起着重要作用。在工艺参数设置为 40  $^{\circ}\text{C}$ -3.1 mm-3 mm/s 时,钛镍合金穿刺针的热变形量最大达到 0.012 mm,系统影响量约为 0.1 mm。此外,温度对穿刺精度的影响程度大于穿刺针直径和进针速度的影响。

## 1 穿刺机器人特性与分析模型构建

### 1.1 机器人设计特点

如图 1 所示,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,线控机器人的核心部件系统主要由微米级精度(10  $\mu\text{m}$ )的高精度直线模组和穿刺针部件组成。为了实现精准控制,精密直线运动副直接驱动穿刺针的精密穿刺进给(0.1 mm)。高精度电机组件通过齿轮传递和绕线回转轴驱动穿刺针实现弯曲变路径功能。为起到较好的驱控传递作用,力控线和穿刺针都采用了 TiNi 记忆合金材质,能够配合电机控制较好实现变路径准确复位(0.1 mm),保障设计运行精度优于 0.1 mm 精度准确的穿刺系统位置控制<sup>[14-16]</sup>。目前,直接影响到穿刺过程精度稳定性的因素主要体现在温度条件和穿刺过程的肌体动力学变化。

为分析温度对系统精度温性的影响规律,本文针对图 1 所示的关键穿刺部件,进行温度  $T$ 、直径  $D$  和速度  $V$  的典型因素水平实验分析<sup>[17-19]</sup>。

### 1.2 计算分析模型构建

根据图 1 结构,进行热场分析和结构分析的方式,首先进行瞬态和静态温度场的分析,获取穿

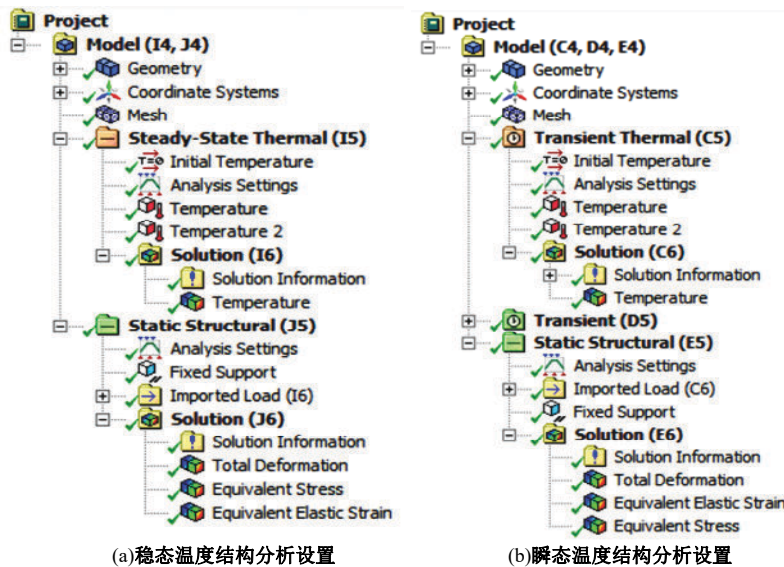


图 1 精密线控变路径穿刺机器人关键结构特点

Fig. 1 Key structural characteristics of precision wire controlled variable path puncture robot

刺针温度场的分析结果,并利用温度场结果约束结构分析的分均匀温度场边界设置,实现结构位移及精度的分析<sup>[20]</sup>;同时,基于正交实验分析设

计,进行典型工况的多因素多水平分析,结果揭示温度对机器人精度变动的规律。计算分析模型如图 2 和图 3 所示。



(a)稳态温度结构分析设置

(b)瞬态温度结构分析设置

图 2 热场和结构力学耦合分析设置

Fig. 2 Analysis and setting of thermal field and structural mechanics coupling analysis method

## 2 分析结果

根据图 3 所示步骤,首先进行温度场分析,结果如图 4 所示,并采用红外测温仪进行相同温度边界的比对实验,结果表明:仿真分析和实验分析

结果都体现出线控机器人穿刺部件在温度边界约束下,整体结构的非均匀温度场的变化特点突出,验证了仿真分析的可行性。

根据图 2 和图 3 所示,通过 ANSYS 温度场的分析结果,进行穿刺针结构分析的非均匀温度场

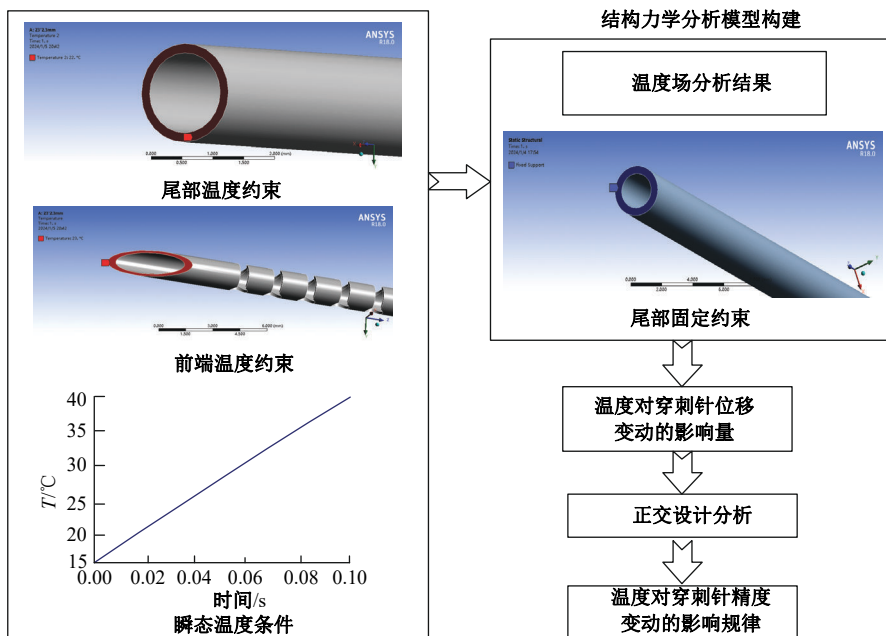


图 3 温度对穿刺针结构精度影响分析模型设计

Fig. 3 Analysis model design for influence of temperature on precision of puncture needle structure

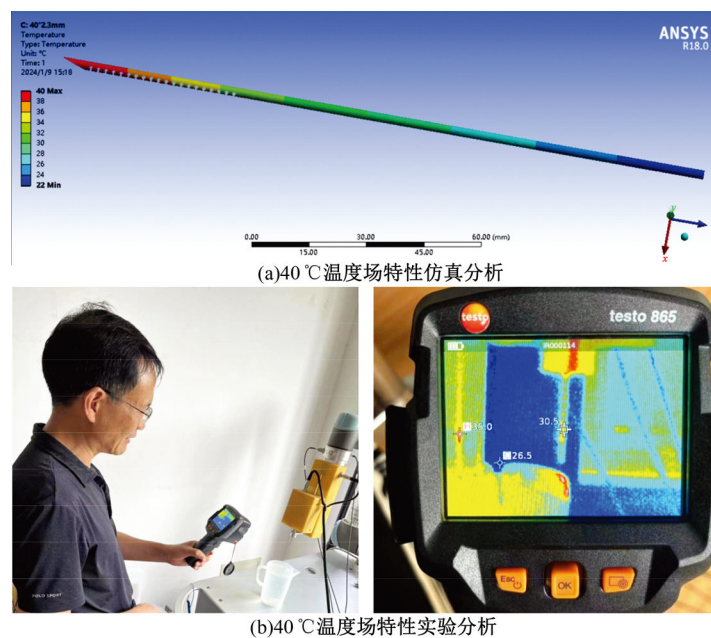


图 4 温度场特性仿真及实验分析

Fig. 4 Temperature field characteristics simulation and experimental analysis

耦合边界约束设置,获取结构位移变化如图 5 所示。结果表明:①瞬态和稳态分析结果一致;②最大位移变形量是 40°边界约束时的 0.011 855 mm;③按照系统精度设计 0.1 mm 指标和部件对系统 10 倍影响的评测特性,部件变动量 0.011 855 必将影响到系统 0.1 mm 左右的精度变动;④温度对变路径穿刺机器人的系统精度影响显著,必须进行严格的温度场工艺控制。

为进一步进行温度对穿刺机器人精度影响的

规律研究,将温度  $T$ 、直径  $D$  和速度  $V$  作为影响钛镍合金穿刺针部件位移变动的主要因素,进行 3 因素 5 水平分析,结果见表 1。

如表 1 所示,当钛镍合金针尖端的温度  $T$  为 40 °C、直径  $D$  为 3.1 mm、进针速度  $V$  为 3 mm/s 时,钛镍合金穿刺针的热位移量最大为  $1.229 2e-2$  mm。

当温度  $T$  为 23 °C、直径  $D$  为 2.3 mm、进针速度  $V$  为 1 mm/s 时,钛镍合金穿刺针的热位移量最小为  $5.832 8e-4$  mm。

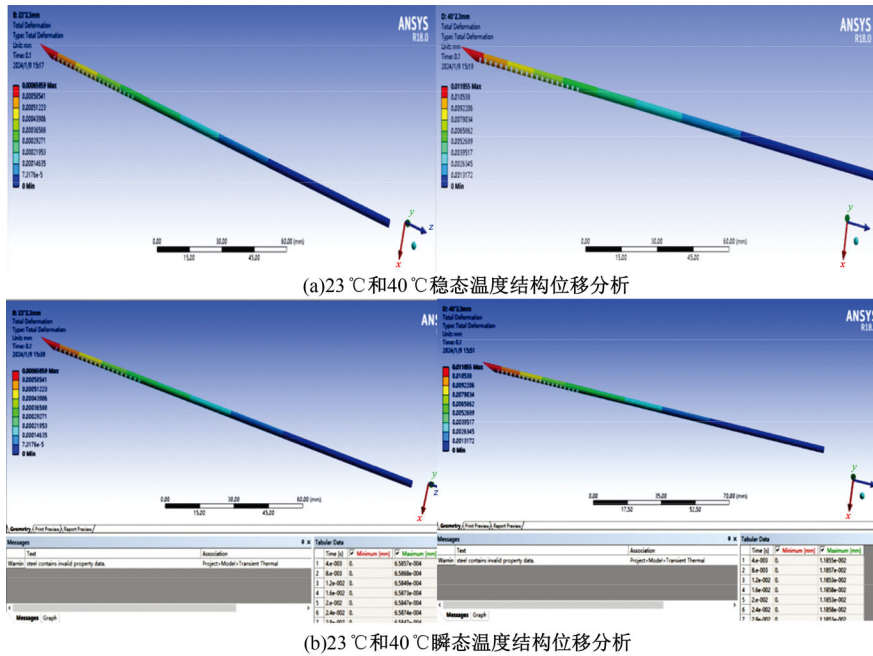


图 5 温度对结构位移变形的影响分析

Fig. 5 Analysis of influence of temperature on structural displacement deformation

表 1 热因素对穿刺针位移变动影响的正交实验分析数据

Table 1 Orthogonal experimental analysis data on influence of thermal factors on displacement changes of puncture needles

序号	1(T)/°C	2(D)/mm	3(V)/(mm·s <sup>-1</sup> )	热位移/mm
1	23	2.3	1	5.832 7×10 <sup>-4</sup>
2	23	2.5	3	6.613 1×10 <sup>-4</sup>
3	23	2.7	5	6.669 2×10 <sup>-4</sup>
4	23	2.9	8	6.779 6×10 <sup>-4</sup>
5	23	3.1	10	6.829 1×10 <sup>-4</sup>
6	30	2.3	3	5.268 7×10 <sup>-3</sup>
7	30	2.5	5	5.290 3×10 <sup>-3</sup>
8	30	2.7	8	5.335 4×10 <sup>-3</sup>
9	30	2.9	10	5.423 7×10 <sup>-3</sup>
10	30	3.1	1	5.463 3×10 <sup>-3</sup>
11	37	2.3	5	9.878 7×10 <sup>-3</sup>
12	37	2.5	8	9.919 4×10 <sup>-3</sup>
13	37	2.7	10	1.000 4×10 <sup>-2</sup>
14	37	2.9	1	1.016 9×10 <sup>-2</sup>
15	37	3.1	3	1.024 4×10 <sup>-2</sup>
16	39	2.3	8	1.119 6×10 <sup>-2</sup>
17	39	2.5	10	1.124 2×10 <sup>-2</sup>
18	39	2.7	1	1.133 8×10 <sup>-2</sup>
19	39	2.9	3	1.154 3×10 <sup>-2</sup>
20	39	3.1	5	1.160 9×10 <sup>-2</sup>
21	40	2.3	10	1.185 4×10 <sup>-2</sup>
22	40	2.5	1	1.190 3×10 <sup>-2</sup>
23	40	2.7	3	1.200 5×10 <sup>-2</sup>
24	40	2.9	5	1.220 3×10 <sup>-2</sup>
25	40	3.1	8	1.229 2×10 <sup>-2</sup>

### 3 数据分析

为揭示主要因素对结构位移变化的影响规律,进行数据分析。

#### 3.1 方差分析

通过方差分析揭示因素对实验结果的影响是否显著,并确定  $T$ 、 $D$  和  $V$  这 3 个因素的显著性。如表 2 所示,因素  $T$  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  $\alpha$  为 0.1(置信度为 90%)时,该因素对穿刺针热变形的影响是显著的。因素  $V$  和因素  $D$  所对应的  $F$  值分别为 2.09、1.00,它们未达到  $\alpha$  为 0.1(置信度为 90%),因此,因素  $V$  和因素  $D$  对钛镍合金针热变形位移的影响较小;影响柔性针弯曲的主次因素依次为  $T > D > V$ 。

表 2 方差分析

Table 2 Analysis of variance

因素	偏差平方和	自由度	方差估计	$F$ 值	$F_{0.1}(4,4)$	$F_{0.05}(4,4)$	显著性
$T$	10.9	4	5.4	15.2	9.0	19.0	显著
$D$	1.5	4	0.7	2.1	9.0	19.0	不显著
$V$	0.7	4	0.3	1.0	9.0	19.0	不显著

#### 3.2 回归分析

为了进一步确定温度  $T$ 、直径  $D$  和速度  $V$  的规律性关系,对表 3 中的温度  $T$ 、直径  $D$  和速度  $V$  进行回归拟合分析,可以得到钛镍合金热变形位

移量大小值  $Y$  与  $T$ 、 $D$  和  $V$  的回归方程:

$$Y = 0.00067T + 0.000402D - 7.4 \times 10^{-6}V - 0.01581 \quad (1)$$

为了验证所得回归方程的可信度,对式(1)进行方差分析和模型的显著性检验,得到表 3 所示数据。

表 3 方差分析结果

Table 3 Results of analysis of variance

方差来源	Prob>F	显著性	回归方程系数
模型	<0.000 1	显著	0.914

由表 3 可以看出,方差分析得到的回归模型“Prob>F”小于 0.000 1,回归方程系数为 0.914,回归方程拟合度高、模型显著,式(1)能够很好地揭示表 1 所示实验结果规律。

## 4 结 论

(1)影响钛镍合金变路径穿刺针热位移量达到 0.01 mm 以上,系统精度影响达到 0.1 mm 以上,温度对精密微创变路径机器人的精度影响显著;特别是分析结果量化指标表明:温度影响精度变动显著性突出,关键参数的影响穿刺针精度的顺序为温度  $T$ >直径  $D$ >进针速度  $V$ 。

(2)温度为 40 °C、直径为 3.1 mm、进针速度为 3 mm/s 时钛镍合金穿刺针的热位移量最大,为 1.229 2e-2 mm;温度为 23 °C、直径为 2.3 mm、进针速度为 1 mm/s 时穿刺针的热位移量最小,为 5.832 8e-4 mm;需要根据穿刺工艺和条件要求设置合理的温控条件。

(3)由方差分析可知,温度  $T$  对钛镍合金针整体热变形量的影响最大。

(4)变路径穿刺针温度条件对结构的影响属于非线性变化的特点,主要因素影响穿刺针位移  $Y$  变化的规律是  $Y = 0.00067T + 0.000402D - 7.4 \times 10^{-6}V - 0.01581$ ,回归分析该规律置信度高。

## 参考文献:

- [1] 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.  
Duan Xing-guang, Wen Hao, He Rui, et al. Research progress and key technology analysis of thoracoabdominal percutaneous puncture robot[J]. Robot, 2021, 43(5):567-584.
- [2] Donder A, Baena F R. 3-D path-following control for steerable needles with fiber Bragg gratings in multi-core fibers[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2022, 70(3): 1072-1085.
- [3] 张帆,何彦霖,周康鹏,等.穿刺手术柔性针路径规划技术现状和展望[J].电子测量与仪器学报,2023,37(6):1-13.  
Zhang Fan, He Yan-lin, Zhou Kang-peng, et al. The current status and prospects of flexible needle path planning technology for puncture surgery[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(6):1-13.
- [4] Goh G S, Yue W M, Guo C M. Comparative demographics and outcomes of minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion in Chinese, Malays, and Indians[J]. Clinical Spine Surgery, 2021, 34(2): 66-72.
- [5] 王乃堃,骆敏舟,陆丽娟.穿刺机器人在微创外科手术中的应用进展[J].中国疼痛医学杂志,2020,26(5):376-380.  
Wang Nai-kun, Luo Min-zhou, Lu Li-juan. Progress in the application of puncture robots in minimally invasive surgery[J]. Chinese Journal of Pain Medicine, 2020, 26(5):376-380.
- [6] Kim J E, Yoo H S, Choi D J. Comparison of minimal invasive versus biportal endoscopic transforaminal lumbar interbody fusion for single-level lumbar disease[J]. Clinical Spine Surgery, 2021, 34(2): 64-71.
- [7] 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,2018,3(4):193-197.  
Tian Wei. The current research status and prospects of medical robots in China[J]. Journal of Clinical and Research Orthopedics, 2018, 3(4): 193-197.
- [8] 李霞.机器人辅助柔性针软组织穿刺系统研究[D].湘潭:湘潭大学自动化与电子信息学院,2016.  
Li Xia. Research on robot assisted flexible needle soft tissue puncture system[D]. Xiangtan: School of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, 2016.
- [9] 王田苗,郝雨飞,杨兴帮,等.软体机器人:结构、驱动、传感与控制[J].机械工程学报,2017,53(13):1-12.  
Wang Tian-miao, Hao Yu-fei, Yang Xing-bang, et al. Soft robot: structure, drive, sensing and control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-12.
- [10] 霍本岩,赵新刚,韩建达,等.基于可达性决策的柔性针穿刺控制方法[J].控制理论与应用,2014,

- 31(10):1423-1424.
- Huo Ben-yan, Zhao Xin-gang, Han Jian-da, et al. Flexible needle puncture control method based on accessibility decision[J]. Control Theory and Application, 2014, 31(10):1423-1424.
- [11] 雷静桃,王洋,程利亚,等. 基于复位路径包络误差和改进人工势力场法的复位机器人安全策略[J]. 机械工程学报,2020, 56(1): 9-19.
- Lei Jing-tao, Wang Yang, Cheng Li-ya, et al. Safety strategy for reset robots based on reset path envelope error and improved artificial force field method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(1): 9-19.
- [12] 张少华. 微创穿刺手术系统关键技术及穿刺定位精度实验研究[D]. 北京:北京理工大学机械与车辆学院, 2012.
- Zhang Shao-hua. Experimental study on key technologies and puncture positioning accuracy of minimally invasive puncture surgery system[D]. Beijing: School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, 2012.
- [13] 孙椰望,刘宇行. 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): 274-278.
- Sun Ye-wang, Liu Yu-xing. Design of flexible needle insertion control technology for lumbar spine nerve minimally invasive robot[J]. Journal of Neck and Back Pain, 2021, 42(2):274-278.
- [14] 殷谦,尚建忠. 柔性波动鳍两栖机器人鳍面结构与运动仿真[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(11): 2954-2960.
- Yin Qian, Shang Jian-zhong. Design and motion simulation of fin surface structure for flexible wave fin amphibious robot[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42 (11): 2954-2960.
- [15] 嵇建成,王玉峰,付建军,等. 康复助行机器人倾覆稳定性分析[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(2): 70-72.
- Ji Jian-cheng, Wang Yu-feng, Fu Jian-jun, et al. Stability analysis of rehabilitation walking robot overturning[J]. Industrial Control Computer, 2024, 37 (2): 70-72.
- [16] 刘泽华. 柔索驱动式主动柔性针穿刺机器人机构的设计及分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学机械动力工程学院, 2020.
- Liu Ze-hua. Design and analysis of a flexible cable driven active flexible needle puncture robot mechanism [D]. Harbin: School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, 2020.
- [17] 董欣勃,魏操兵,商晋. 冷压缩机温度场仿真及其冷却参数优化分析[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(8): 1851-1860.
- Dong Xin-bo, Wei Cao-bing, Shang Jin . Simulation of temperature field and optimization analysis of cooling parameters for cold compressors[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41 (8): 1851-1860.
- [18] 王文涛. RV减速器热——结构耦合分析[D]. 北京:北方工业大学机械与材料工程学院,2016.
- Wang Wen-tao . Thermal structural coupling analysis of RV reducer[D]. Beijing: School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, 2016.
- [19] 董年鑫,王希贵,吴哲,等. 基于热固耦合的林区原油管道机器人壳体优化分析[J]. 森林工程, 2022, 38(1): 101-107.
- Dong Nian-xin, Wang Xi-gui, Wu Zhe, et al. Optimization analysis of robot shell for crude oil pipeline in forest areas based on thermal solid coupling[J]. Forest Engineering, 2022, 38(1): 101-107.
- [20] 卢博文. 摆线针轮传动系统热分析[D]. 大连:大连交通大学机械工程学院,2021.
- Lu Bo-wen. Thermal analysis of cycloid needle wheel transmission system[D]. Dalian: School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, 2021.