

超声电机在磁吸式腹腔镜中的应用研究*

张嘉亮, 孙志峻, 杨涛, 唐雄峰, 韦聪文

(南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室 南京, 210016)

摘要 为了解决单孔腹腔镜手术戳卡处器械拥堵的问题,首先,提出了一款磁吸式腹腔镜摄像系统,该系统拥有视野变换及图像变焦功能;其次,设计了两款超声电机作为驱动源,以提高运动精度,并减小体积和质量,避免定位磁场的干扰;最后,利用COMSOL有限元分析软件对电机定子进行了仿真分析,确定了电机定子的工作模式,并模拟了定子的运动。实验样机的机械输出特性表明:旋转超声电机在驱动电压 $U_{pp}=100\text{ V}$ 时,最大扭矩为 $0.51\text{ mN}\cdot\text{m}$,最小分辨率为 5.5 mrad ;直线超声电机在驱动电压 $U_{pp}=200\text{ V}$ 时,最大推力为 107.8 mN ,最小分辨率为 $24\text{ }\mu\text{m}$,满足驱动要求。该磁吸式腹腔镜具有结构简单、响应快、精度高等优点。

关键词 腹腔镜;磁吸式;超声电机;有限元分析

中图分类号 TM356;TB552

引言

单孔腹腔镜手术^[1]是通过脐部或自然腔道置入手术器械的微创手术,与传统多孔腹腔镜手术相比,其通过减少切口数量的方式减少病人疼痛,降低伤口感染几率^[2],是当前微创手术的重要发展方向。但是,在单孔腹腔镜手术中,所有手术器械均从同一个戳卡空间进入,器械间相互干扰,不利于形成操作三角^[3],提升了操作难度。磁性锚定与导航技术^[4]利用磁体之间或磁体与顺磁性物质之间产生的磁场吸引力^[5],实现了锚定磁体与目标磁体之间的非接触式空间定位。操作磁场吸引力可以实现对目标磁体的移动和控制,通过将磁吸式腹腔镜器械应用于单孔腹腔镜手术中,可将医疗器械从戳卡处提前置于腹腔内,减少了戳卡处腹腔镜器械数目,提高了单孔腹腔镜手术的可操作性^[6]。

研究人员通过增加驱动机构以增加腹腔镜的自由度数,获取更多视野。Simi等^[7]研制的磁吸式腹腔镜尺寸为 $12.7\text{ mm}\times 95\text{ mm}$ (直径 \times 长度),质量约为 20 g ,摄像头依靠2个电磁电机调节视野。Liu等^[8]研制的腹腔镜通过电磁电机驱动蜗轮蜗杆带动摄像头倾斜,并配备折叠式照明机构,其直径为 18 mm ,长度为 72 mm 。然而,电磁电机的使用会导

致驱动磁场与定位磁场相互干扰,且齿轮减速器等装置会增加重量,延长传动链,导致机构复杂,不利于高精度控制。相关研究利用磁场进行驱动,通过磁场产生力或扭矩,带动内部磁性机构运动。Cheng等^[9]设计了无线磁吸式腹腔镜,利用摄像头和反射镜减小腹腔镜径向尺寸,通过外部磁场带动腹腔镜的移动和旋转。Garbin等^[10]设计了一款长度为 35 mm 的磁吸式腹腔镜,其末端使用球形磁铁,通过改变外部磁场可以驱动腹腔镜发生偏转。但是,这类腹腔镜存在定位与驱动磁场干扰、运动精度低、运动迟滞等问题,且磁场随着腹壁厚度的增加驱动力显著减小。超声电机^[11-12]利用压电材料的逆压电效应激发弹性体振动,将电能转换为机械振动能,再通过摩擦力将机械振动能转换为动子的动能。该电机具有结构紧凑、运动精度高、瞬态响应快、断电自锁以及免受电磁干扰等特点,通过直接驱动的方式可以大幅减少传动环节,在精密器械、医疗及航空航天等领域中得到广泛应用^[13-14]。

本研究设计了两款超声电机作为磁吸式腹腔镜摄像系统的驱动源。首先,进行腹腔镜结构设计,并根据腹腔镜尺寸设计了两款超声电机,在此基础上进行模态仿真和谐响应分析;其次,对样机的输出特性进行实验;最后,搭建了磁吸式腹腔镜摄像系统,并测量了最小步进角。

* 国家自然科学基金资助项目(52275058);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NJ2022007)

收稿日期:2023-08-16;修回日期:2023-11-15

1 超声电机结构设计

1.1 腹腔镜结构

腹腔镜三维结构如图1所示。其外径为20 mm,长为100 mm,外壳采用3D打印的方式制作。腹腔镜整体包含磁吸模块、视野旋转模块及图像变焦模块。磁吸模块采用N52钕铁硼永磁体锚定与牵引;视野旋转模块通过反射镜的旋转进行视野变换;图像变焦模块采用直线电机推动摄像头,改变物像间距离,实现图像缩放的功能。腹腔镜底部配有LED灯,为手术环境提供照明。

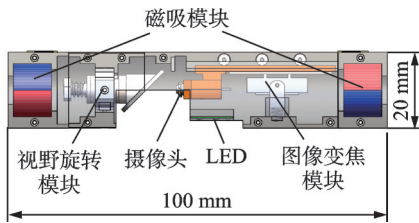


图1 腹腔镜三维结构

Fig.1 Laparoscopic three-dimensional structure

根据腹腔镜结构及驱动功能可知,旋转超声电机和直线超声电机应能放置于内径为18 mm的套管中。超声电机性能要求见表1。

表1 超声电机性能要求

Tab.1 Performance requirements for ultrasonic motors

超声电机性能	要求
旋转超声电机扭矩/(mN·m)	≥0.1
旋转超声电机分辨率/mrad	≤17.5
直线超声电机推力/mN	≥50
直线超声电机分辨率/μm	≤50

1.2 旋转超声电机结构

旋转超声电机结构如图2所示。该电机由定子、前后转子、弹簧、螺母及键等部件组成,用以驱动反射镜的旋转。电机的一端转子带有输出轴和键槽,另一端转子通过键同步转动。两端转子依靠斜面嵌入定子固定,弹簧为电机提供预压力,改变弹簧压缩长度即可改变预压力大小。考虑到该定子振动无固定节线或节点,四周通过硅胶片固定电机。

旋转超声电机定子是由带通孔的多边形块和4片沿厚度方向极化的铅钛酸铅(plumb zirconate titanate,简称PZT)-8压电陶瓷组成。旋转电机定子压电陶瓷驱动方式如图3所示。多边形定子通过倒角可以减小壁厚,增大振幅。压电陶瓷粘贴于定子四周表面,相对表面的陶瓷极化方向相同,组成一

相,4片陶瓷分为A、B两相。利用泊松效应,激发定子的模式。

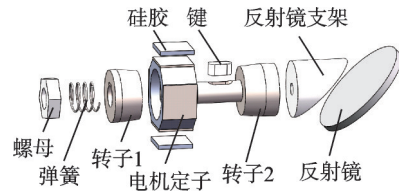


图2 旋转超声电机结构

Fig.2 Rotating ultrasonic motor structure

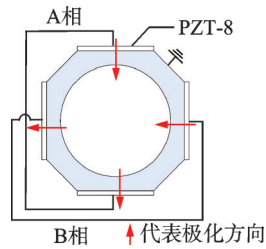


图3 旋转电机定子压电陶瓷驱动方式

Fig.3 Driving method of piezoelectric ceramics for rotating motor stator

1.3 直线超声电机结构

直线超声电机结构如图4所示。该电机主要由定子、定子支架、弹簧、Al₂O₃陶瓷条、滑条及轴承等部件组成,用于带动摄像头的前后移动,完成图像变焦功能。直线超声电机定子依靠M1螺栓固定于定子支架,底部弹簧施加预压力后,定子将与陶瓷条压紧,驱动滑条运动。滑条上方小型轴承用于减小滑条与基体的摩擦力,便于定子驱动。

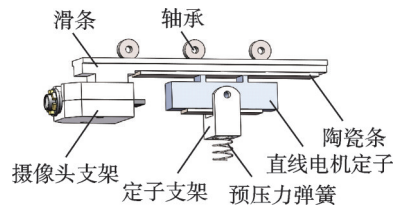


图4 直线超声电机结构

Fig.4 Linear ultrasonic motor structure

直线电机压电陶瓷驱动方式如图5所示。其定子下方通过环氧树脂粘贴2片0.5 mm厚的PZT-8压电陶瓷片,沿厚度方向极化,极化方向相反,2片陶瓷分别为A、B相。

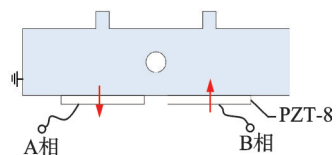


图5 直线电机压电陶瓷驱动方式

Fig.5 Driving method of piezoelectric ceramics for linear motor stator

2 电机工作模态与谐响应分析

2.1 旋转超声电机仿真分析

为了验证所提超声电机的性能,本研究利

用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对电机定子模态进行仿真分析,定子材料为 6061 铝合金,压电元件为 PZT-8。超声电机的材料参数见表 2。

表 2 超声电机的材料参数

Tab.2 Material parameters of ultrasonic motors

材料	弹性模量/GPa	压电常数/(C·m ⁻²)	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
6061 铝合金	69	—	0.33	2 900
PZT-8	$\begin{bmatrix} 120.6 & 53.5 & 51.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 120.6 & 51.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 104.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 31.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 31.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 34.6 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -3.9 \\ 0 & 0 & -3.9 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 10.3 & 0 \\ 10.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	—	7 600

图 6 为旋转电机定子模态。该电机采用模态叠加的原理进行驱动,其中 B₀₃ 模态的 A、B 两相特征频率皆为 105.09 kHz。

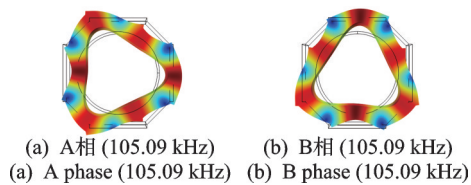


图 6 旋转电机定子模态

Fig.6 Stator modes of rotating motor

当频率为 105.09 kHz 时,对旋转电机定子进行谐响应仿真。旋转电机定子谐响应分析如图 7 所示。通过对定子 A、B 两相分别施加相位差为 $\pi/2$ 的正弦激励信号,激发电机定子产生两同型、同频且正交的 B₀₃ 面内模态,构成行波,位于定子内边线与锥形转子接触区域的质点会产生沿同一方向的椭圆运动,通过摩擦力推动转子连续转动。在同一时刻,定子 B₀₃ 模态的波谷处质点与转子接触,共有 3 个接触区。当激励电压相位差为 $-\pi/2$ 时,将会产生反向行波推动锥形转子反向转动,实现电机反转。

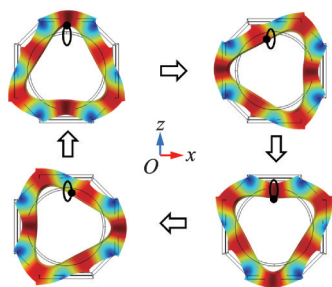


图 7 旋转电机定子谐响应分析

Fig.7 Stator harmonic response analysis of rotating motor

2.2 直线超声电机仿真分析

直线超声电机利用面内二阶弯曲振动模态 B₂ 和一阶纵向振动模态 L₁ 作为电机的工作模态,材料为 6061 铝合金。直线电机定子模态如图 8 所示。其中,弯振模态 B₂ 特征频率为 141.67 kHz,纵振模态 L₁ 特征频率为 141.7 kHz,两者相差 30 Hz,满足设计要求。定子顶部的驱动足设计在二阶弯振的波峰处。

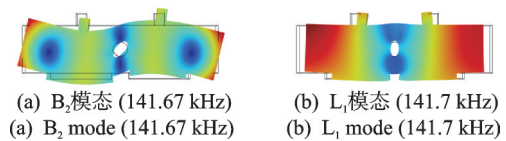


图 8 直线电机定子模态

Fig.8 Stator modes of linear motor

直线电机定子谐响应分析如图 9 所示。图中展示了定子在一个周期内的 4 个运动过程。当 A 相与 B 相激励信号相位差为 $\pi/2$ 时,可以同时激发出 2 种模态,处于 2 个驱动足上表面的质点呈现椭圆运动,再通过驱动足与定子之间的摩擦力推动滑条进行移动,实现直线运动。当激励信号相位差为 $-\pi/2$ 时,驱动足形成的椭圆轨迹呈反向状态,进而带动滑条进行反向运动。

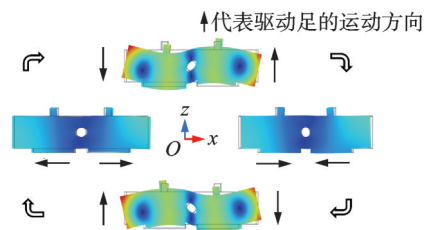


图 9 直线电机定子谐响应分析

Fig.9 Stator harmonic response analysis of linear motor

3 实验结果与讨论

根据有限元分析的结果制作了旋转超声电机样机及直线超声电机定子样机。图 10 为样机实物图。图 10(a) 中的旋转电机样机, 总质量为 4.3 g, 3 个方向最大尺寸为 10 mm × 10 mm × 16.5 mm (长 × 宽 × 高)。图 10(b) 中的直线电机定子样机, 尺寸为 16 mm × 3 mm × 3.9 mm (长 × 宽 × 高)。

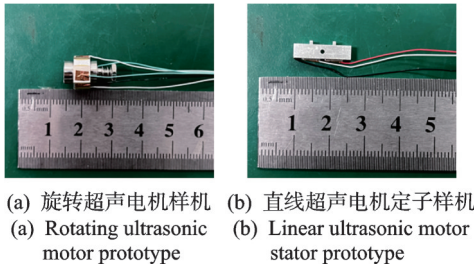


图 10 样机实物图

Fig.10 Pictures of the prototype

3.1 电机定子频响特性

采用德国 Polytec 公司生产的多普勒激光测振仪 (PSV-500F-B) 及功率放大器 (HFVA-83A), 对两款超声电机定子样机进行振动测试实验, 分别对两定子施加 $U_{pp}=100\text{ V}$ 正弦激励电压进行扫频实验。频响曲线测试平台如图 11 所示。



图 11 频响曲线测试平台

Fig.11 Frequency response curve testing platform

超声电机定子频率响应测试结果如图 12 所示。图 12(a) 为旋转电机定子频率响应特性曲线, 面内三阶弯振 B_{03} 模态谐振频率的 A、B 两相分别为 102.828 kHz 和 102.125 kHz, 频率一致性良好, 且面内三阶弯振模态周围没有近邻频率的谐振峰, 表明电机工作过程中没有其他的振动模态对电机产生干扰。图 12(b) 为直线超声电机频率响应曲线, 面内二阶弯振 B_2 模态的谐振频率为 138.421 kHz, 一阶纵振 L 模态的谐振频率为 139.296 kHz, 两模态频率相差 875 Hz, 符合预期要求, 且两工作模态附近未出

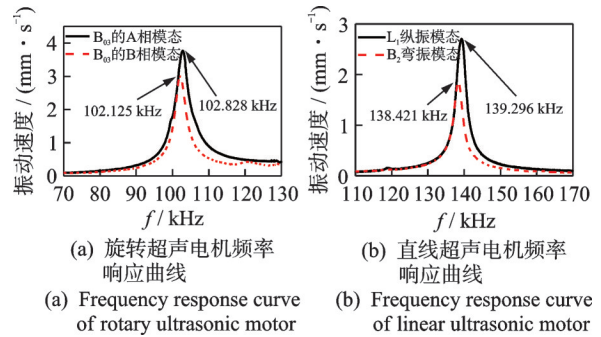


图 12 超声电机定子频率响应测试结果

Fig.12 Frequency response tests results of ultrasonic motor stators

现其他干扰模态。

2 种定子的谐振频率实测结果与有限元软件仿真的计算结果有一定差别, 主要原因有: ① 仿真软件中压电陶瓷和定子是作为整体结构, 在理想的情况下进行仿真分析, 而实际情况下压电陶瓷和定子是通

3.2 样机机械输出特性

电机输出特性实验平台见图 13。采用 1 台信号发生器 (AFG3022C) 及 2 台功率放大器 (HFVA-83A) 驱动电机, 旋转电机的转速通过红外线非接触测量仪 (DLY-2301) 进行测量, 直线电机的移速通过激光位移传感器 (LK-H050) 进行测量, 通过悬挂砝码对电机进行负载增减。

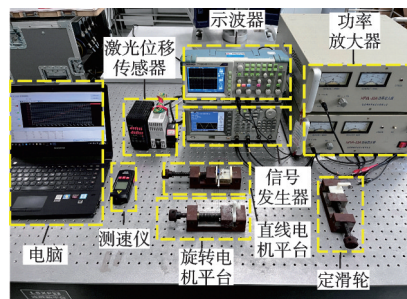


图 13 电机输出特性实验平台

Fig.13 Experimental platform for motor output characteristics

保持预压力为 0.05 N, 激励电压峰峰值为 100 V 时, 在空载情况下的旋转电机频率-转速曲线如图 14 所示。样机有效工作频率范围为 100.5 kHz ~ 107.5 kHz。其中, 当频率为 104.5 kHz 时, 电机输出轴双向转速最高, 分别达到 507、482 r/min。由此可以看出, 样机工作频率在定子共振频率附近时转速达到最大值, 远离共振频率后转速下降。

旋转电机转速-转矩曲线如图 15 所示。由图可知:在样机的最佳驱动频率 104.5 kHz 下,保持预压力 0.05 N 和峰峰值电压 100 V,随着电机负载的增大,输出轴转速下降,最大扭矩为 0.51 mN·m。

旋转电机的顺逆时针输出特性有所差异,这是因为加工误差以及陶瓷粘贴位置偏差导致 A、B 两相所激发出的定子共振振幅不一致,使其模态的驱动效果受到影响。

由于机器人内部的直线电机动子无法进行机械

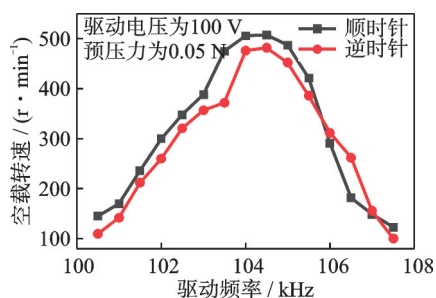


图 14 旋转电机频率-转速曲线

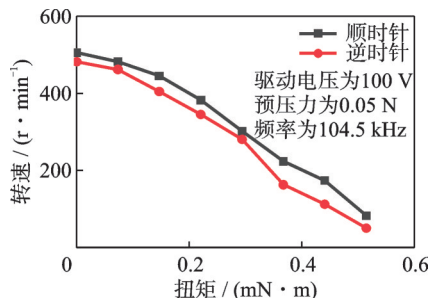


图 15 旋转电机转速-转矩曲线

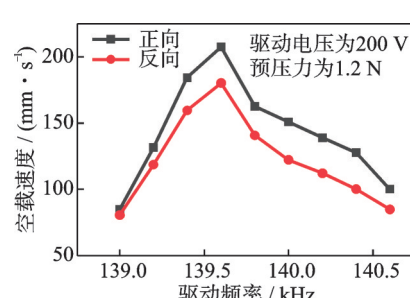


图 16 直线电机频率-速度曲线

Fig.14 Frequency-speed curve of rotary motor

Fig.15 Rotational speed-torque curve of rotary motor

Fig.16 Frequency-speed curve of linear motor

为了评估直线电机在正反方向运动的输出特性,进行了负载特性研究。在相同的实验条件下(预压力为 1.2 N、电压峰峰值为 200 V、驱动频率为 139.6 kHz),改变动子负载,测量其运动速度。直线电机速度-负载曲线如图 17 所示。由图可知:随着负载的增加,电机动子在两个运动方向上的运行速度逐渐降低;当负载质量超过 107.8 mN 后,动子在正反两个方向上的速度均降至 0。

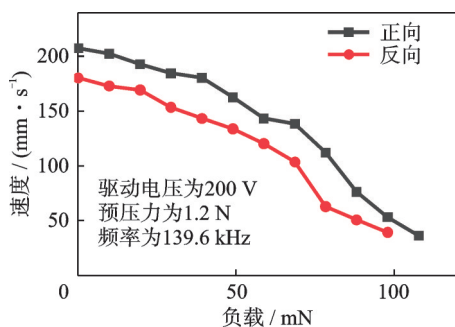


图 17 直线电机速度-负载曲线

Fig.17 Speed-load curve of linear motor

3.3 腹腔镜平台搭建

根据上述设计制作了图 18 所示的磁吸式腹腔镜系统。该系统主要包括外部磁吸模块、内部腹腔镜机器人、磁吸模块控制系统以及腹腔镜模块控制系统等部分。腹腔镜机器人通过戳卡进入腹腔后,

输出特性测试,因此重新搭建平台进行数据测量。动、定子之间的预压力设置为 1.2 N,激励电压峰峰值为 200 V,驱动频率在范围 139 kHz~140.6 kHz 之间,频率点间隔为 200 Hz。直线电机频率-速度曲线见图 16。可以看出:在正反两个方向上,样机的空载速度随着驱动频率的增加先上升后下降,存在最佳驱动频率;样机正反方向运动最佳驱动频率为 139.6 kHz,最大运行速度分别为 207.5 和 180.4 mm/s。

可以通过外部磁吸模块对其进行锚定及腹壁表面三自由度移动。磁吸装置配有磁力调节系统,由磁吸模块控制系统控制,可以避免由于磁场吸力过大而对腹壁过度挤压引起组织损伤。通过按键控制板输入指令信号后,腹腔镜模块控制系统将对腹腔镜内部超声电机进行驱动控制,实现手术视角切换。

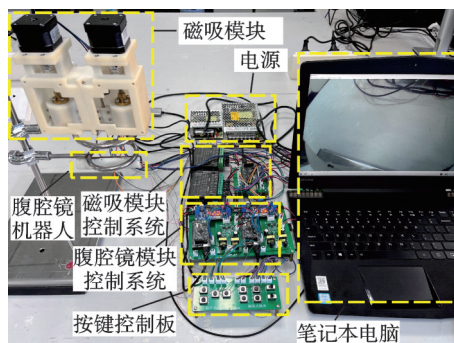


图 18 磁吸式腹腔镜系统

Fig.18 Magnetic laparoscopic system

电机精度关系到系统精度,因此通过驱动器进行最小步进角度及位移测量。电机分辨率实验结果如图 19 所示。由图 19(a)可知,旋转超声电机在激励电压峰峰值为 100 V 时,角度分辨率约为 5.5 mrad。由图 19(b)可知,直线超声电机在激励电压峰峰值为 200 V 时,位移分辨率可以达到 24 μm。所设计的两款超声电机可以满足腹腔镜的驱动要求。

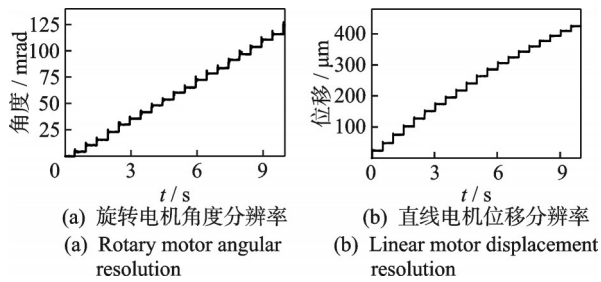


图19 电机分辨率实验结果

Fig.19 Experimental results of motor resolution

4 结论

1) 提出了一款用于单孔腹腔镜手术的磁吸式腹腔镜摄像系统,设计了两款超声电机作为腹腔镜的直接驱动源。

2) 对电机定子的工作模态和驱动原理进行描述,通过样机定子的扫频实验,证明其工作原理的可行性。

3) 对两款样机进行了机械特性输出实验,搭建了磁吸式腹腔镜平台,并测量了最小步进角,表明超声电机作为腹腔镜驱动源的可行性。

参 考 文 献

[1] ROMANELLI J R, EARLE D B. Single-port laparoscopic surgery: an overview[J]. *Surgical Endoscopy*, 2009, 23(7): 1419-1427.

[2] KHANDELWAL S, WRIGHT A S, FIGUEREDO E, et al. Single-incision laparoscopy: training, techniques, and safe introduction to clinical practice[J]. *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques: Part A*, 2011, 21(8): 687-693.

[3] 董鼎辉, 朱皓阳, 任冯刚, 等. 超微创磁锚定腹腔镜系统的研制[J]. *中国医疗器械杂志*, 2016, 40(2): 83-85. DONG Dinghui, ZHU Haoyang, REN Fenggang, et al. The development of the super minimally invasive magnetic anchoring laparoscopic system[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2016, 40(2): 83-85.(in Chinese)

[4] 杨桓, 折占飞, 吴荣谦, 等. 磁外科应用进展[J]. *临床医学研究与实践*, 2018, 3(15): 1-4. YANG Huan, SHE Zhanfei, WU Rongqian, et al. Progress in the application of magnetic surgery[J]. *Clinical Research and Practice*, 2018, 3(15): 1-4.(in Chinese)

[5] PARK S, BERGS R A, EBERHART R, et al. Trocarless instrumentation for laparoscopy: magnetic positioning of intra-abdominal camera and retractor[J]. *Annals of Surgery*, 2007, 245(3): 379-384.

[6] BEST S L, CADEDDU J A. Development of magnetic anchoring and guidance systems for minimally inva-

sive surgery[J]. *Indian Journal of Urology*, 2010, 26(3): 418-422.

- [7] SIMI M, PICKENS R, MENCIASSI A, et al. Fine tilt tuning of a laparoscopic camera by local magnetic actuation: two-port nephrectomy experience on human cadavers[J]. *Surgical Innovation*, 2013, 20(4): 385-394.
- [8] LIU X L, ABDOLMALAKI R Y, ZUO T, et al. Transformable in vivo Robotic laparoscopic camera with optimized illumination system for single-port access surgery: initial prototype[J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1585-1596.
- [9] CHENG T, ZHANG X, NG C S H, et al. A novel magnetic anchored and steered camera robot for single port access surgery[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Brisbane, QLD, Australia: IEEE, 2018: 1406-1412.
- [10] GARBIN N, SLAWINSKI P R, AIELLO G, et al. Laparoscopic camera based on an orthogonal magnet arrangement[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(2): 924-929.
- [11] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 313-314.
- [12] 闫鹤, 孙志峻, 郑炬炬, 等. 基于面内模态的双腿式微型旋转超声电机[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(4): 818-825. YAN He, SUN Zhijun, ZHENG Juju, et al. Double-legged micro-rotary ultrasonic motor based on in-plane mode[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 41(4): 818-825. (in Chinese)
- [13] 王亮, 舒承有, 金家楣, 等. 用于驱动履带的夹心式压电作动器的动力学特性[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(5): 128-135. WANG Liang, SHU Chengyou, JIN Jiamei, et al. Dynamical characteristics of sandwich-type piezoelectric actuator for driving track[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(5): 128-135.(in Chinese)
- [14] 时运来, 林瑜阳, 张军. 压电作动磁共振兼容手术机器人的研究进展[J]. *压电与声光*, 2019, 41(1): 106-114. SHI Yunlai, LIN Yuyang, ZHANG Jun. Recent development on magnetic resonance compatible surgical robots driven by piezoelectric actuator[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41(1): 106-114.(in Chinese)



第一作者简介:张嘉亮,男,1997年11月生,硕士生。主要研究方向为机电一体化。E-mail: zhangjl@nuaa.edu.cn

通信作者简介:孙志峻,男,1970年2月生,博士、教授。主要研究方向为机器人及机电一体化。

E-mail: meejsun@nuaa.edu.cn