

文章编号 1004-924X(2015)01-0102-08

肠道驻留机构的设计和实验

贺 术*, 颜国正, 柯 全, 王志武

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 研究并设计了一种微型肠道驻留机构以实现胃肠道机器人在人体肠道特殊环境下的有效驻留。该驻留机构采用径向伸出三组腿的方式实现扩张, 扩张后三组腿仍然处于封闭状态, 从而有效降低了肠道组织被夹住的风险。对驻留机构与肠道之间的相互作用进行了建模分析, 并将驻留机构的驻留力分为库伦摩擦力和边缘阻力两部分, 分析了其产生机理。通过实验测试了驻留机构的扩张力以及驻留力。实验结果表明: 驻留机构的扩张力与理论分析较为接近, 驻留力大小与肠道直径、驻留腿扩张直径以及驻留机构速度有关。当驻留腿的扩张直径为 20~26 mm 时, 驻留力大小为 0.15~0.4 N; 当驻留腿扩张直径大于 26 mm 时, 驻留力迅速增加, 为 0.5~1.8 N。设计的肠道驻留机构体积小、安全, 可较好地适应肠道的生理环境, 并为肠道诊疗微型机器人驻留机构的设计提供了一种新的思路。

关键词: 胃肠道机器人; 驻留机构; 边缘阻力; 内窥镜

中图分类号: TH776.1; TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0102

Design and experiment of an intestinal anchoring mechanism

HE Shu*, YAN Guo-zheng, KE Quan, WANG Zhi-wu

(School of Electronic Information and Electrical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

* Corresponding author, E-mail: heshu86@163.com

Abstract: A miniature intestinal anchoring mechanism is designed to realize the effective anchor of a gastrointestinal robotic endoscope in the special environment of human intestine. The mechanism explores a kind of expansion method through protruding three sets of legs radially, which lowers the risk of intestinal clamping because the three sets of legs show a enclosed structure after expansion. At the terminal of every legs, a curved plate is fixed to enlarge the contacting area between legs and intestine, which reduces the damage to intestinal tract. The interaction between anchoring mechanism and intestinal tract is modeled. The anchoring force is divided into two parts, Coulomb friction and marginal resistance, and its mechanism is analyzed. The expanding force and anchoring force are tested through experiments. The experimental results show that the expanding force of the anchoring mechanism is close to the theoretical analysis, and the anchoring force is related to intestinal diameters, the expanding diameters of anchoring legs and the speed of the anchoring mechanism. When the diameters of the anchoring legs are 20—26 mm, the anchoring force is 0.15—0.4 N; when the diameters of anchoring legs are greater than 26 mm, the anchoring force increases rapidly between 0.5 N and 1.8 N. The anchoring mechanism proposed in this paper is characterized by safe and a

收稿日期: 2014-06-28; 修订日期: 2014-08-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 31170968)

smaller volume and is suitable for the physical environment of the intestine. It provides a new idea for design of the intestinal anchoring mechanism for micro robots in gastro intestinal tract diagnosis.

Key words: gastrointestinal tract robot; anchoring mechanism; marginal resistance; endoscope

1 引 言

胃肠道疾病严重危害人类健康,提高对胃肠疾病的诊断能力是防治该类疾病的关键。传统的消化道内窥镜和胶囊内窥镜是现有的临床诊查方式,但是消化道内窥镜存在检测过程痛苦、检测存在盲区等缺点;胶囊内窥镜则存在被动检测、漏检率高等缺点^[1-2]。针对这些问题,一些机构和研究人员研制了新型的机器人内窥镜实现对胃肠道的主动、无创/微创检测^[3-5]。根据驱动方式不同,机器人内窥镜可分为体外驱动和体内驱动,体外驱动主要依靠机器人体内永磁体与体外磁场的相互作用来实现机器人在消化道内的主动运动^[6],体内驱动则主要依靠机器人特定的机械结构及控制来实现自主运动^[7]。

肠道驻留机构在体内驱动式机器人中发挥着重要作用,尺蠖式运动^[8-9]、多足式运动^[10-11]、划桨式运动^[12]等都需要驻留机构的参与。尺蠖式机器人的驻留机构一般只用于肠道驻留,而多足式和划桨式机器人的驻留机构除了用于肠道驻留外还直接参与机器人运动。在设计驻留机构的形状时,尖钩或倒刺一类的结构更多地被多足式和划桨式机器人采用,这类结构能够使驻留机构与肠道之间产生更大的作用力,但对肠道组织有潜在的损伤风险。尺蠖式机器人驻留机构的设计更加多元化,气囊式^[13]、撑腿式^[14-15]、夹取式^[16-17]、以及吸附式^[18]结构都曾被采用。由于肠道的特殊结构及其腔内的特殊环境,肠道驻留机构的设计应考虑以下几点:第一,为保证肠道组织的安全,驻留机构与肠道的接触面不宜过小;第二,驻留机构在肠道内扩张后应能产生足够的驻留力以保证驻留的有效性;第三,由于肠道直径的变化范围较大,所以驻留机构的最大扩张直径应该设计的比较大,且扩张大小能自动适应肠道直径;第四,为了减小机器人的体积,驻留机构应尽量小。

本文设计了一种具有大伸缩直径比的驻留机构,并对该机构与肠道之间的相互作用进行了建模分析。提出了描述驻留力的方程,并通过实验

研究了肠道直径、扩张直径、驻留机构运动速度等参数对驻留力的影响。本文的工作为肠道诊疗微型机器人驻留机构的设计提供了一种新的思路,也为其它管道机器人的设计提供了参考。

2 机构设计及分析

图1所示为肠道驻留机构的爆炸视图,对各部分零件的说明如下:(1)螺丝组,用于顶层挡板和底层挡板之间的固定;(2)顶层挡板;(3)顶层滚珠,用于减小顶层挡板和顶层内齿圈之间的摩擦;(4)顶层内齿圈与顶层小齿轮;(5)套环,用来对两个内齿圈进行轴向限位;(6)套筒组,用来对顶层挡板与底层挡板进行轴向限位;(7)驻留腿;(8)底层内齿圈与底层小齿轮;(9)底层滚珠;(10)底层挡板;(11)减速箱;(12)微型电机。

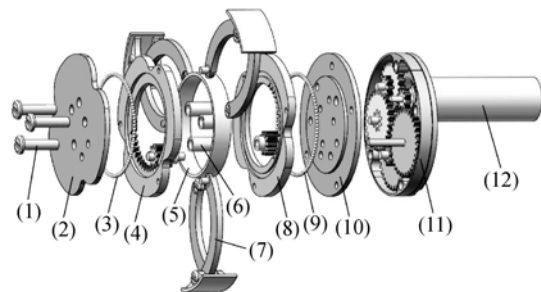
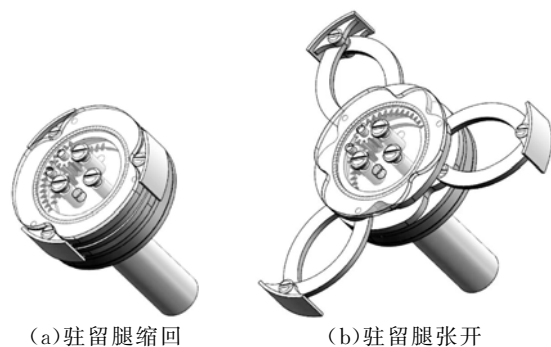


图1 肠道驻留机构爆炸视图

Fig. 1 Exploded views of intestinal anchoring mechanism



(a) 驻留腿收缩回

(b) 驻留腿张开

(a) Resident legs contracted (a) Resident legs opened

图2 肠道驻留机构示意图(顶层挡板已设置为透明)

Fig. 2 Design drawing of intestinal anchoring mechanism

驻留机构由微型电机驱动,经减速器减速增力,图 1(4)、(8)中的小齿轮相互啮合,是减速器的最后两个齿轮,它们齿数相同,带动两个内齿圈以相同的转速相对转动。在驻留机构中,每条驻留腿由 2 个弧形零件铰接而成,两端分别固定在顶层和底层内齿圈上,因此内齿圈的相对转动可控制驻留腿的伸出与缩回。驻留腿的顶端设置一个瓦片状金属零件以增大驻留腿与肠道的接触面积,降低对肠道组织的损伤风险。此外,扩张后的驻留腿仍然呈封闭曲线,可防止肠道被驻留机构夹住,提高了安全性。

当每组驻留腿固定在顶层和底层内齿圈上的两个端点在轴向上重合时,驻留腿多了一个围绕端点转动的自由度,这种情况是应该避免出现的。因此内齿圈被设计成不完全齿以限定驻留腿的伸出范围。图 2(a)为驻留机构驻留腿缩回时,图 2(b)为驻留腿完全张开时。

为了实现机构的微型化,采用深圳万至达公司型号为 OT-0412NB-5557RL-15.1-200 的微型直流空心杯电机作为机构的驱动器,电机的直径为 4 mm。表 1 所示为驻留机构的部分设计参数。

表 1 驻留机构设计参数

Tab.1 Parameters of the anchoring mechanism

设计参数	数值
驻留机构直径/mm	14
驻留机构最大扩张直径/mm	32
驻留机构厚度(不包括电机)/mm	5.8
减速器减速比	445.7
减速器减速级数	5

图 3 所示为对驻留机构驻留腿的受力分析图,O 点为驻留机构横截面中心点,A 为驻留腿与顶层内齿圈的连接点,B 为驻留腿与底层内齿圈的连接点,D 为驻留腿顶端中心点,C 点为 AB 与 OD 的交点。假设与内齿圈啮合的小齿轮的转动方向如图所示,此时驻留腿处于打开过程中,A 点和 B 点的运动方向如图中箭头所示。 F_a 和 F_b 分别为驻留腿在 A 点和 B 点所受到的力, F_d 为驻留腿的扩张力。由受力分析图可得:

$$F_d = (F_a + F_b) \sin \beta, \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} F_a = \frac{T_{\text{motor}} \cdot n_{\text{RMM}} \cdot \eta_a}{6 \cdot r_c} \\ F_b = \frac{T_{\text{motor}} \cdot n_{\text{RMM}} \cdot \eta_b}{6 \cdot r_c} \end{cases}, \quad (2)$$

式(2)中, T_{motor} 为电机转矩, n_{RMM} 为减速比, η_a 和 η_b 分别是电机输出到 A 点和 B 点的传动效率, r_c 是 OA 和 OB 的长度,为 6.25 mm。因为多了一级齿轮传动, η_a 比 η_b 小。设 L_c 为驻留机构的扩张半径,则有:

$$L_c = |CD| + r_c \cdot \cos \beta + L_{\text{wp}}, \quad (3)$$

式中: L_{wp} 为 D 点外围零部件的厚度,CD 段的长度如式(4)所示:

$$|CD| = \sqrt{L_{\text{leg}}^2 - (r_c \cdot \sin \beta)^2}, \quad (4)$$

式中: L_{leg} 为 AD 或 BD 的长度,为 9.58 mm。

根据式(1)~(4)可以得到驻留机构扩张半径与扩张力之间的关系,如图 4 所示。可看出扩张力在扩张半径小于 8 mm 时有微弱上升,此后为下降趋势,扩张力最大为 2.55 N,最小为 0.9 N。

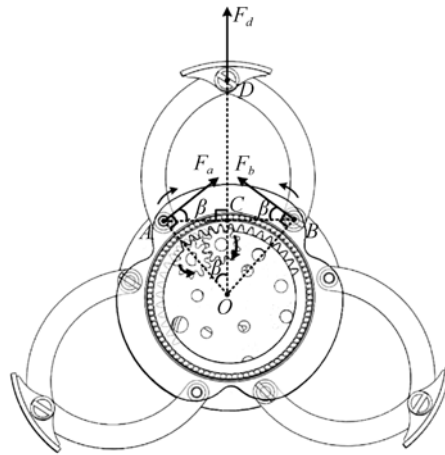


图 3 驻留机构力学分析

Fig.3 Force analysis of anchoring mechanism

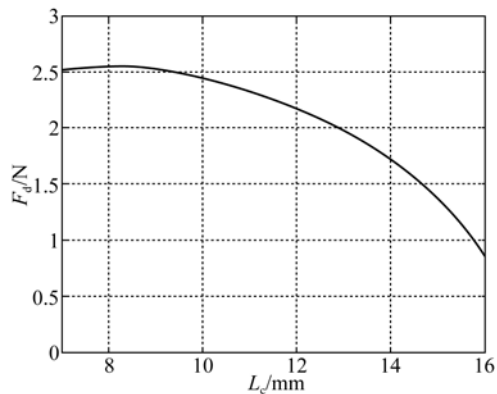


图 4 驻留机构扩张半径与扩张力的关系

Fig.4 Relationship between expanding radius and expanding force

3 建模分析

驻留机构在扩张肠道后,由于肠道的特殊性,3个驻留面使肠道发生了形变,根据这一特点建立了驻留机构扩张肠道的模型,如图5所示。图中O为驻留机构横截面中心,(x,y,θ)为模型的一个三维坐标。肠道被驻留机构扩张后在驻留面的边缘形成塌陷变形,使肠道与驻留面的侧面有一定的接触区域。将驻留面与肠道的接触区域分为三个部分,A区域为肠道与驻留面侧面的接触区域,在此区域内肠道作用于驻留面的压强为 $p_A(x,y,\theta)$,B区域为肠道与驻留面正面的接触区域,在此区域内肠道作用于驻留面的压强为 $p_B(x,y,\theta)$,C区域为肠道与驻留面另一侧面的接触区域,在此区域内肠道作用于驻留面的压强为 $p_C(x,y,\theta)$ 。

根据建立的模型,将驻留机构在肠道内所受到的轴向力分为两类,第一类是库伦摩擦力,轴向的库伦摩擦力只与驻留面的B区域有关,且与B区域内受到的肠道压力成正比;第二类为边缘阻力,它是由于肠道在驻留面的边缘产生形变造成的,轴向的边缘阻力与A、C区域受到的肠道压力有关。由于在有效驻留状态下,驻留机构在扩张肠道后与肠道处于相对静止状态,所以这种情况下驻留机构受到的轴向黏滞力为0。因此,驻留机构扩张肠道后在肠道内所受到的轴向力为:

$$f = f_c + f_m, \quad (5)$$

其中: f_c 为库伦摩擦力, f_m 为边缘阻力。

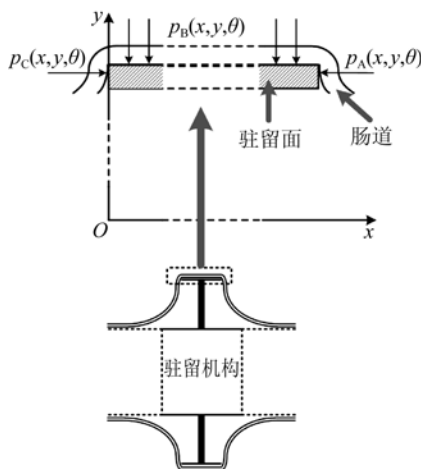


图5 驻留机构扩张肠道模型

Fig.5 Model of intestinal expansion by anchoring mechanism

根据图5所建立的模型,驻留机构所受到的轴向库伦摩擦力为:

$$f_c = \mu_s \iint_B p_B(x,y,\theta) dB, \quad (6)$$

式中: μ_s 为驻留面与肠道之间的静摩擦系数。肠道的特殊环境中,普通的材料跟肠道之间的摩擦系数很小,一般在 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 数量级,所以驻留机构受到的库伦摩擦力很小。假设肠道作用在驻留面B区域的压强处处相等,均为 p_B ,则驻留机构所受到的库伦摩擦力为:

$$f_c = \mu_s p_B S_B, \quad (7)$$

式中: S_B 为驻留面B区域的面积。在摩擦系数和面积都一定的情况下,库伦摩擦力与肠道作用在驻留面的压强成正比。

根据模型,驻留机构所受到的轴向边缘阻力为驻留面A区域和C区域所受到的肠道压力之差,具体表达式为:

$$f_m = \iint_C p_C(x,y,\theta) dC - \iint_A p_A(x,y,\theta) dA. \quad (8)$$

如果式中前项大于后项,说明轴向边缘阻力的方向跟C区域所受到的肠道压力的方向相同,反之则与A区域所受到的肠道压力的方向相同。假设驻留机构在C区域和A区域受到的肠道压强均为 P_{AC} ,那么边缘阻力可表达为:

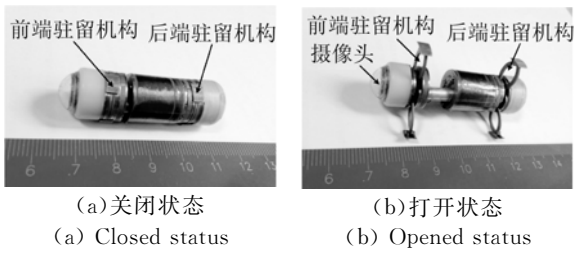
$$f_m = P_{AC} (S_C - S_A). \quad (9)$$

式中: S_C 和 S_A 分别为肠道与C区域和A区域的接触面积。

如果驻留机构没有受到除肠道外的其它外力作用,则 S_C 和 S_A ,驻留机构受到的等效轴向边缘阻力为0。如果驻留机构受到向右的外力作用,由于肠道的变形导致 S_A 增大, S_C 减小,驻留机构与肠道间产生边缘阻力来抵抗外力的作用。如果外力增大到一定的程度,驻留机构与肠道间不能产生足够的边缘阻力,就会出现驻留失效。在驻留有效和失效的临界点时的库伦摩擦力和边缘阻力之和为最大驻留力。

4 应用及实验

图6所示为驻留-伸缩式胃肠道机器人内窥镜样机,该机器人包括2个驻留机构,分别位于机器人的前端和后端。



(a) 关闭状态 (b) 打开状态
(a) Closed status (b) Opened status

图 6 驻留-伸缩式胃肠道机器人内窥镜样机

Fig. 6 Prototype of an anchoring-extending intestinal robotic endoscope

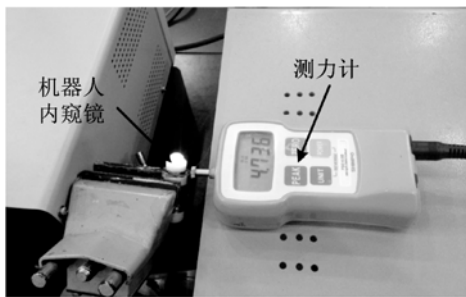


图 7 驻留机构扩张力测试平台

Fig. 7 Expanding force test of anchoring mechanism

为了测试驻留机构扩张力的特性,利用机器人内窥镜样机进行实验,实验平台如图 7 所示。机器人内窥镜被虎台钳固定,测力计(FGC-0.5B, Shimpo, 日本)被固定在另一平台上,驻留机构的一组腿与测力计的测力点保持同一高度,并且其打开方向的延长线与测力杆重合。调节驻留机构与测力计的距离,并测试驻留机构在不同扩张半径下的扩张力。测试结果如图 8 所示。从图中可以看出,扩张力测试结果随扩张半径的变化与理论分析一致,但比理论结果小,这是因为理论分析中忽略了一些机构零件之间的损耗。

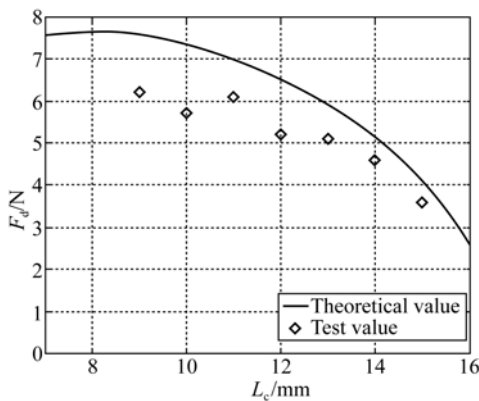


图 8 驻留机构扩张力测试结果

Fig. 8 Test results of expanding force

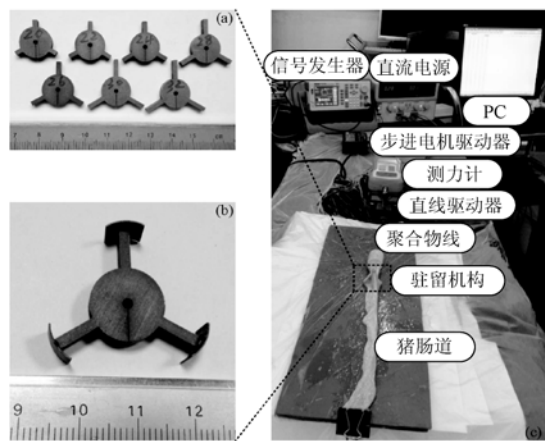


图 9 驻留机构驻留力测试平台

Fig. 9 Test platform for anchoring force

驻留机构最重要的性能指标是其驻留性能,驻留力的大小直接决定了驻留机构的驻留性能。实验平台如图 9 所示。图 9(a)为一组驻留机构模拟件,其直径变化模拟驻留机构的扩张过程,最小直径为 20 mm,最大直径为 32 mm。如图 9(b)所示,在 3 条腿的末端固定有瓦片状金属片,其内径为 14 mm,厚度为 0.3 mm,高度为 4 mm,宽度为 50°。驻留机构模拟件的零件均由不锈钢加工而成。测试平台如图 9(c)所示,其核心部分是由步进电机驱动的直线驱动器以及固定在直线驱动器上面的测力计。直线驱动器由步进电机驱动器驱动,速度通过信号发生器触发方波的频率控制。一段猪离体肠道被放置在平台上,高度与测力计测力点相同,且保持与测力计测力杆共线。驻留机构模拟件被放置在离体肠道内,其姿态模拟驻留机构扩张肠道的状态。驻留机构模拟件与测力计通过材质为聚合物的线相连,调整离体肠道高度使其处于水平位置,为了减小肠道对测力的影响,肠道末端套有亚克力管。测力计与上位机通过串口通信传递数据。

驻留力测试过程如下:

(1) 确定如下测试参数:驻留机构直径,肠道直径,直线驱动器速度,并按照预定的测试参数准备实验平台。测力计的数据采样频率为 100 Hz。

(2) 启动直线驱动器,同时开始采集测力计数据。观察驻留机构模拟件的状态,记录下驻留机构与肠道之间出现相对滑动时刻的测力计数据,该数据即为当前参数下的最大驻留力。

(3) 相同测试参数下重复测试 3 次,取平

均值。

图 10 所示为测试结果,其中图 10(a)、(b)、(c)为在相同直线驱动器速度、不同肠道直径条件下驻留力测试结果的对比。从测试结果中可看出,当扩张直径为 20~26 mm 时,驻留力随扩张直径的变化不明显,且驻留力与肠道直径没有明显的相关性,驻留力的大小约为 0.15~0.4 N。

当驻留直径大于 26 mm 时,驻留力随扩张直径的增大有显著增加,为 0.5~1.8 N,且在相同驻留直径下与肠道直径成反比。图 10(d)、(e)、(f)为在相同肠道直径、不同直线驱动器速度下驻留力测试结果的对比。从测试结果中可看出,在相同肠道直径下,驻留力随着直线驱动器速度的增加而增大。

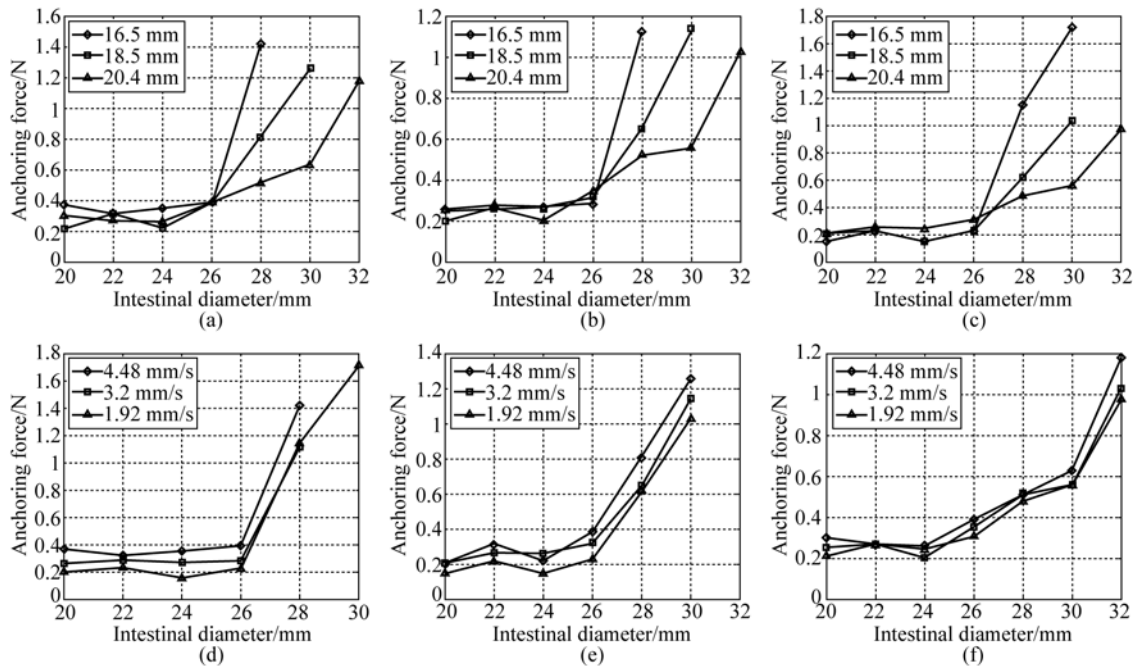


图 10 直线驱动器速度相等时的驻留力测试结果对比,速度为:(a) 4.48 mm/s,(b) 3.2 mm/s,(c) 1.92 mm/s;肠道直径相等时的驻留力测试结果对比,肠道直径为:(d) 16.5 mm,(e) 18.5 mm,(f) 20.4 mm

Fig. 10 Comparison of experimental results when the speeds of linear actuator are: (a) 4.48 mm/s, (b) 3.2 mm/s, and (c) 1.92 mm/s, respectively; Comparison of experimental results when the intestinal diameters are: (d) 16.5 mm, (e) 18.5 mm, and (f) 20.4 mm, respectively.

对测试结果分析如下:

(1) 扩张直径存在一个拐点,当小于这个拐点时,驻留力随扩张直径的变化不明显;当大于这个拐点时,驻留力随着扩张直径的增加增长显著。因此,使驻留机构的扩张直径大于拐点直径有利于提高驻留效果的可靠性。

(2) 由于库伦摩擦力与速度无关,所以速度对驻留力的影响主要体现在边缘阻力上。速度的大小会影响肠道与驻留面侧面的接触面积,如式(9)所示,速度越大,造成的面积差就越大,从而导致更大的边缘阻力。

(3) 实验中的肠道为离体肠道,驻留力只与肠

道自身特性相关。在活体环境中会有更多对驻留力产生影响的因素,如腹腔压力、肠道自身的移动性运动复合波以及供血的影响等。所以在活体环境下,驻留机构的驻留力特性可能与离体环境有差异。

5 结 论

本文根据肠道的特点设计了一种微型肠道驻留机构,其直径为 14 mm,厚度为 5.8 mm,最大扩张直径为 32 mm。驻留机构的扩张采用径向伸出 3 组腿的方式,扩张后 3 组腿仍然处于封闭

状态,可有效降低肠道组织被夹住的风险。根据驻留机构的机械结构,对其扩张力进行了分析,结果显示驻留力的理论值在 0.9~2.55 N。然后,对驻留机构扩张肠道进行了建模分析,将驻留机构的驻留力分为库伦摩擦力和边缘阻力两部分,并依据模型分析了这两种力的产生机理。最后,

设计了一组实验来验证驻留机构的扩张力,并研究了驻留力的大小及其影响因素。实验结果表明:驻留机构的扩张力与理论分析基本相符,驻留力的大小与肠道直径、驻留机构扩张直径以及驻留机构的速度等因素相关。本文的研究可为管道机器人的设计提供参考。

参考文献:

- [1] VALDASTRI P, SIMI M, WEBSTER R J. Advanced technologies for gastrointestinal endoscopy [J]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2012, 14: 397-429.
- [2] IDDAN G, GAVRIEL M, ARKADY G, et al.. Wireless capsule endoscopy [J]. *Nature*, 2000, 405: 417.
- [3] NAJARIAN S, AFHARI E. Evolutions and future directions of surgical robotics: A review [J]. *International Journal of Clinical Medicine*, 2012, 3 (2): 75-82.
- [4] KELLER J, FIBBE C, ROSIEN U, et al.. Recent advances in capsule endoscopy: development of maneuverable capsules [J]. *Expert Review of Gastroenterology & Hepatology*, 2012, 6(5): 561-566.
- [5] CIUTI G, MENCIASSI A, DARIO P. Capsule endoscopy: from current achievements to open challenges [J]. *Biomedical Engineering, IEEE Reviews in*, 2011, 4: 59-72.
- [6] CARPI F, SHAHEED H. Grand challenges in magnetic capsule endoscopy [J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2013, 10(4): 433-436.
- [7] DARIO P, CARROZZA M C, LENCIONI L, et al.. A microrobotic system for colonoscopy [C]. In *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, 1997.
- [8] CHEN W W, YAN G ZH, WANG ZH W, et al.. A wireless capsule robot with spiral legs for human intestine [J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2013.
- [9] GAO P, YANG G ZH, WANG ZH W, et al.. A robotic endoscope based on minimally invasive locomotion and wireless techniques for human colon [J]. *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2011, 7(3): 256-267.
- [10] VALDASTRI P, WEBSTER R J, QUAGLIA C, et al.. A new mechanism for mesoscale legged locomotion in compliant tubular environments [J]. *Robotics, IEEE Transactions on*, 2009, 25 (5): 1047-1057.
- [11] QUIRINI M, MENCIASSI A, SERGIO S, et al.. Design and fabrication of a motor legged capsule for the active exploration of the gastrointestinal tract [J]. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 2008, 13(2): 169-179.
- [12] PARK H, KIM D, KIM B. A robotic colonoscope with long stroke and reliable leg clamping [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(8): 1461-1466.
- [13] 高鹏, 颜国正, 王志武, 等. 肠道微机器人柔性运动系统 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20 (3): 541-549.
- GAO P, YAN G ZH, WANG ZH W, et al.. Flexible locomotion system for gastrointestinal microrobots [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 541-549. (in Chinese)
- [14] LIN W, SHI Y T, JIA ZH W, et al.. Design of a wireless anchoring and extending micro robot system for gastrointestinal tract [J]. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2013, 9(2): 167-179.
- [15] 陈雯雯, 颜国正, 贺木, 等. 胶囊内窥镜在肠道中的钳位 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21 (6): 1553-1560.
- CHEN W W, YAN G ZH, HE SH, et al.. Clamping mechanism of capsule endoscope in intestine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (6): 1553-1560. (in Chinese)
- [16] PHEE L, ACCOTOD, MENCIASSI A, et al.. Analysis and development of locomotion devices for the

gastrointestinal tract [J]. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on*, 2002,49(6): 613-616.

- [17] ACCOTO D, PASSANISI S, GUGLIELMELLI E. Pinch locomotion: A novel propulsion technique for endoscopic robots [C]. In *Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012 4th

IEEE RAS & EMBS International Conference on, 2012.

- [18] PHEE L, ACCOTO D, MENCIASSI A, *et al.*. Analysis of robotic locomotion devices for the gastrointestinal tract [J]. *Robotics Research*, 2003: 467-483.

作者简介:



贺 术(1986—),男,湖南桃江人,博士研究生,2008年、2011年于西安理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微型机电系统控制理论与方法,精密工程与微型机器人研究等。E-mail: heshu86@163.com

导师简介:



颜国正(1961—),男,湖南桃江人,教授,1993年于吉林工业大学获得博士学位,1995年于南京航空航天大学博士后出站,主要研究方向为智能机器人、微小机电系统。E-mail: gzyan@sjtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)