

肠道内变径胶囊微机器人空间磁力矩特性

张永顺^{①*}, 岳明^②, 郭东明^①, 王殿龙^①, 于宏海^①, 姜生元^③, 张学文^③

① 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024;

② 大连理工大学汽车工程学院, 大连 116024;

③ 北华大学机械工程学院, 吉林 132021

* E-mail: zyshun@dlut.edu.cn

收稿日期: 2008-09-01; 接受日期: 2008-10-28

辽宁省自然科学基金项目(批准号: 20082171)、国家自然科学基金项目(批准号: 60675054, 60275034, 60875064)资助

摘要 提出一种以相邻异向径向磁化瓦状多磁极组成的圆筒式永磁体为外驱动器, 以胶囊机器人内嵌同磁极结构永磁体为内驱动器, 在外驱动器旋转磁场的磁耦合作用下, 驱动变径胶囊机器人在肠道内旋进的驱动控制方法. 根据等效磁荷法建立了偏心状态下磁驱动力矩普遍性数学模型, 对驱动力矩与驱动器磁极结构参数的特性进行了研究, 试验表明该驱动方法具有驱动力矩大、安全可靠等优点, 变径胶囊机器人由径向间隙自补偿, 显著提高了在肠道内的驱动能力, 该磁驱动系统在人体肠道内具有良好的医学应用前景.

关键词

变径胶囊机器人
径向偏心距
磁驱动转矩
等效磁荷法

体内介入治疗具有安全、可靠、无痛等优点, 并迅速成为医学工程领域的主要发展趋势. 人们已经研制出微型消化道胶囊内窥镜, 商业化产品主要有 Given Imaging 公司^[1]的 M2A, RF system 公司的 Norikav3, Olympus Medical System 及重庆金山集团的医疗内窥镜等^[2]. 它们均是利用消化道蠕动进行整个区域检查, 通过装入的 CMOS 微型摄像机, 以无线方式传输检查图像. 存在视觉盲区时, 不能控制姿态和主动返程, 使肠道内一些医疗作业无法完成, 严格来讲, 尚未构成机器人系统. 为了扩展功能, 研制由体外无缆控制进入体内的胶囊机器人已成当务之急^[3], 目标是构成以胶囊内窥镜为载体的微机器人系统, 通过体外无缆驱动控制与姿态调整, 安全的实施窥视诊断、施药、取样等介入医疗作业.

目前, 无缆磁控胶囊机器人被认为是最具有实用化前景的驱动方式, 日本 Ishiyama 等人提出利用三轴亥姆霍兹线圈提供空间旋转磁场, 媒介于内嵌磁体实现表面带螺纹胶囊旋进的驱动方案^[4,5], 但没有介绍空

间旋转磁场的产生原理. 旋进驱动适于大粘度流体环境, 形成的流体动压膜可保护人体软组织不受损伤.

本文提出一种以相邻异向径向磁化瓦状 NdFeB 多磁极组成的圆筒为外驱动器产生旋转磁场, 驱动内嵌磁体变径胶囊机器人旋进的技术方案^[6], 根据等效磁荷法建立的偏心状态磁驱动力矩普遍性数学模型, 对磁驱动力矩特性进行了研究. 提出了一种变径胶囊机器人模型, 通过转速自动调整变径胶囊机器人表面与管壁的间隙, 显著提高了胶囊机器人对弹性变截面肠道的适应能力.

试验表明该驱动系统具有节省能源、驱动力矩大、安全可靠、实用性强等优点, 变径胶囊机器人显著提高了在肠道内的驱动行走能力, 实现了在猪离体肠道内垂直爬行, 该变径胶囊机器人磁驱动系统在生物医学工程领域具有广阔的应用前景.

1 变径胶囊机器人磁驱动原理

研制的驱动装置以相邻异向径向磁化瓦状多磁极 NdFeB 圆筒为外驱动器, 以变径胶囊机器人内嵌

同磁极结构 NdFeB 为内驱动器, 由变频调速电机带动外驱动器产生旋转磁场, 通过内嵌驱动器的磁机耦合作用, 驱动胶囊机器人在充满液体的柔弹性壁管中同步旋转, 其螺旋表面与管壁之间的液体产生流体动压力和保护膜, 推动胶囊机器人沿轴向运动, 工作原理如图 1 所示.

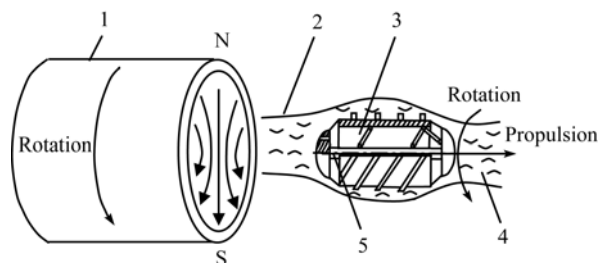


图 1 磁驱动变径胶囊机器人系统工作原理

1. 外驱动器; 2. 肠道; 3. 变径胶囊机器人; 4. 粘性液体; 5. 内驱动器

研制的可变径胶囊机器人外表面由四片外表缠绕分段螺旋肋的铜瓦组合构成, 每块铜瓦分别与同步离心伸展机构连接, 外部裹有乳胶薄膜.

胶囊旋转时, 四片铜瓦在离心力作用下沿径向同步伸展, 推动乳胶囊沿径向膨胀, 通过调整外磁场的转速和铜瓦离心力来改变外表面与管壁的间隙, 实现流体动压力和胶囊机器人速度的控制, 显著提高了胶囊机器人在变截面管径柔弹性肠道内的驱动能力. 图 2(a) 为变径胶囊机器人径向闭合的情形;

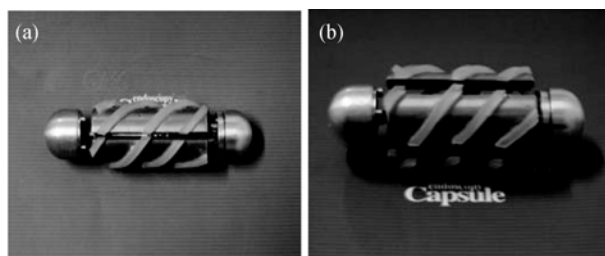


图 2 变径胶囊机器人

(a) 闭合时; (b) 伸展时

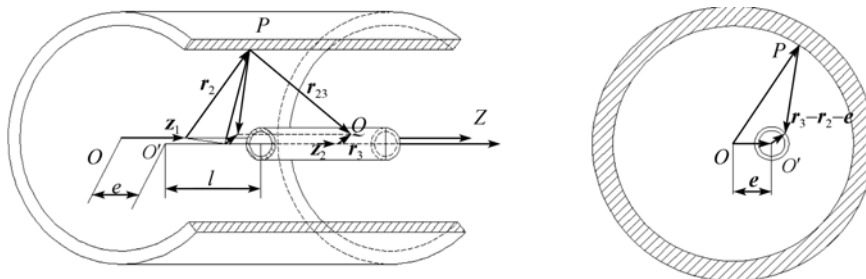


图 4 外驱动器对内驱动器磁矩分析

图 2(b) 为其在离心力的作用下, 铜瓦沿径向同步伸展时的情形.

2 空间磁驱动转矩普遍数学模型

为了研究磁驱动力矩与磁结构参数的关系, 优化内、外驱动器的磁极结构参数, 首先根据等效磁荷法建立驱动器的磁驱动转矩数学模型.

为了简单起见, 给出内、外驱动器为径向相邻异向磁化的两磁极结构, 如图 3 所示, 表面 1, 2, 3, 4 的曲率半径分别为 R_1, R_2, R_3 和 R_4 .

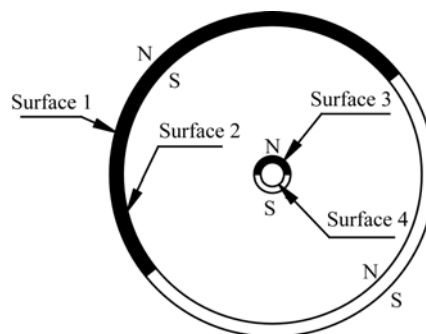


图 3 双磁极驱动器结构图

不失一般性, 考虑内、外圆筒式驱动器的径向偏心, 内、外驱动器均由 n 个径向 N-S 与 S-N 相邻径向磁化的瓦状磁极组成, 外驱动器对内驱动器的磁矩分析如图 4 所示.

从外驱动器的 n 个磁极中任取一个磁极, 研究外驱动器转动时, 该磁极对内驱动器的 n 个磁极的作用力. 最终总磁作用力应该是外驱动器磁极上 1, 2 表面上的磁荷与内驱动器 3, 4 表面上磁荷相互作用力矢量的迭加.

首先研究表面 2 上的磁荷对表面 3 上磁荷的作用力 F_{23} , 根据等效磁荷法, 表面 2 上任一点 P 处的磁荷对表面 3 上任一点 Q 处磁荷的作用力 dF_{23} 可表示为

$$d\mathbf{F}_{23} = -\frac{\sigma_1\sigma_2 R_2 R_3 d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2}{4\pi\mu_0 |\mathbf{r}_{23}|^3} \cdot \mathbf{r}_{23}, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{r}_{23}$ 为 P 点到 Q 点的向径, μ_0 为气隙的磁导率, σ_1, σ_2 为分别为内、外驱动器的磁荷面密度, 负号由异号磁荷的乘积产生, θ_1, θ_2 分别为 P 点和 Q 点在极坐标系中的极角.

根据磁化关系有^[7]

$$|\sigma_1| = B_{r1}, |\sigma_2| = B_{r2},$$

式中, B_{r1}, B_{r2} 分别为内、外驱动器永磁体的剩余磁感应强度. 则(1)式可改写为

$$d\mathbf{F}_{23} = -\frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{R_2 R_3 d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2}{|\mathbf{r}_{23}|^3} \cdot \mathbf{r}_{23}. \quad (2)$$

图 4 中, 设 $\mathbf{r}_2$ 为过 P 点且垂直于 z 轴的圆截面内由圆心到 P 点的向径, $\mathbf{r}_3$ 为过 Q 点且垂直于 z 轴的圆面内由圆心到 Q 点的向径, $\mathbf{e}$ 为径向偏移向径. 由于 $\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ 是分别在两个平行平面内的空间矢量, 故 $\mathbf{r}_{23}$ 在过 Q 点且垂直于 z 轴的圆截面内的投影为 $\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2 + \mathbf{e}$, 故由(2)式可得, $d\mathbf{F}_{23}$ 在过 Q 点且垂直于 z 轴的平面上的分力 $d\mathbf{f}_{23}$ 为^[8]

$$d\mathbf{f}_{23} = -\frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{R_2 R_3 d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2}{|\mathbf{r}_{23}|^3} \cdot (\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2 + \mathbf{e}), \quad (3)$$

则 $d\mathbf{f}_{23}$ 与 $\mathbf{r}_3$ 的向量积即为 P 点磁荷对 Q 点磁荷的作用力矩 $d\mathbf{T}_{23}$ ^[9]

$$\begin{aligned} d\mathbf{T}_{23} &= d\mathbf{f}_{23} \times \mathbf{r}_3 \\ &= \frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{R_2 R_3 d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2}{|\mathbf{r}_{23}|^3} \cdot (\mathbf{r}_3 \times \mathbf{r}_2 + \mathbf{e} \times \mathbf{r}_3). \end{aligned} \quad (4)$$

(4)式即为表面 2 上的磁荷对表面 3 上磁荷磁力矩的微分表达式. 同理可得表面 1, 3, 表面 2, 4 和表面 1, 4 之间的磁驱动力矩微分表达式分别为

$$\begin{cases} d\mathbf{T}_{13} = -\frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi k_{13}\mu_0} \cdot \frac{R_1 R_3 d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2}{|\mathbf{r}_{13}|^3} \cdot (\mathbf{r}_3 \times \mathbf{r}_1 + \mathbf{e} \times \mathbf{r}_3), \\ d\mathbf{T}_{24} = -\frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi k_{24}\mu_0} \cdot \frac{R_2 R_4 d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2}{|\mathbf{r}_{24}|^3} \cdot (\mathbf{r}_4 \times \mathbf{r}_2 + \mathbf{e} \times \mathbf{r}_4), \\ d\mathbf{T}_{14} = -\frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi k_{14}\mu_0} \cdot \frac{R_1 R_4 d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2}{|\mathbf{r}_{14}|^3} \cdot (\mathbf{r}_4 \times \mathbf{r}_1 + \mathbf{e} \times \mathbf{r}_4), \end{cases} \quad (5)$$

式中, k_{13}, k_{24} 和 k_{14} 分别为考虑到表面 1, 3, 表面 2, 4 及表面 1, 4 间的导磁介质不全是真空时对磁导率的

修正系数. (4)式与(5)式中各力矩之和为

$$\begin{aligned} |\mathbf{dT}| &= |\mathbf{dT}_{23} + \mathbf{dT}_{13} + \mathbf{dT}_{24} + \mathbf{dT}_{14}| \\ &= \frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi\mu_0} \cdot \left(\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{r_1^3} + \frac{e \sin \theta_2}{r_2^3} \right) d\theta_1 d\theta_2 dz_1 dz_2, \end{aligned} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_1^3} &= \frac{R_2^2 R_3^2}{|\mathbf{r}_{23}|^3} - \frac{R_1^2 R_3^2}{k_{13} |\mathbf{r}_{13}|^3} - \frac{R_2^2 R_4^2}{k_{24} |\mathbf{r}_{24}|^3} + \frac{R_1^2 R_4^2}{k_{14} |\mathbf{r}_{14}|^3}, \\ \frac{1}{r_2^3} &= \frac{R_2 R_3^2}{|\mathbf{r}_{23}|^3} - \frac{R_1 R_3^2}{k_{13} |\mathbf{r}_{13}|^3} - \frac{R_2 R_4^2}{k_{24} |\mathbf{r}_{24}|^3} + \frac{R_1 R_4^2}{k_{14} |\mathbf{r}_{14}|^3}, \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} |\mathbf{r}_{i,j}| &= \sqrt{(z_2 - z_1)^2 + (R_i \cos \theta_1 - e - R_j \cos \theta_2)^2 + (R_i \sin \theta_1 - R_j \sin \theta_2)^2}, \\ i &= 1, 2, j = 3, 4. \end{aligned}$$

(6)式即为磁驱动力矩微分表达式, 积分(6)式并考虑内驱动器的 n 个磁极相邻交替排列, 得外驱动器上任一个磁极对内驱动器上 n 个磁极的力矩为

$$\begin{aligned} t &= \frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi\mu_0} \cdot \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \int_0^{l_1} \int_l^{l+l_2} \int_\alpha^\beta \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} \left(\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{r_1^3} \right. \\ &\quad \left. + \frac{e \sin \theta_2}{r_2^3} \right) d\theta_2 d\theta_1 dz_2 dz_1, \end{aligned} \quad (7)$$

式中, l_1 为外驱动器的长度, l_2 为外驱动器的长度, l 为外驱动器与内驱动器轴向长度之差的一半, α 为内、外驱动器之间的转角差, $\alpha_i = i \frac{2\pi}{n}$, ($i = 1, 2, \dots, n$); $\beta =$

$\alpha + \frac{2\pi}{n}$, 则外驱动器上 n 个磁极对内驱动器上 n 个磁极总力矩为

$$\begin{aligned} T_M &= n \cdot \frac{B_{r1}B_{r2}}{4\pi\mu_0} \cdot \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \int_0^{l_1} \int_l^{l+l_2} \int_\alpha^\beta \int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} \left(\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{r_1^3} \right. \\ &\quad \left. + \frac{e \sin \theta_2}{r_2^3} \right) d\theta_2 d\theta_1 dz_2 dz_1. \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式为存在偏心情形下外驱动器对内驱动器磁驱动力矩的普遍数学模型, 当内驱动器外形为实心圆柱时, 则 $R_4 = 0$.

3 空间磁驱动转矩特性

计算磁驱动转矩的(8)式涉及复杂的四重积分, 只能进行数值求解. 为了简单起见, 引入两个参数:

$$g = R_2 - R_3, h = R_1 - R_2$$

式中, g 为内外驱动器之间的径向间隙, h 为外驱动器磁环的径向厚度.

影响磁驱动转矩的主要因素有内、外驱动器的结构尺寸; 磁极数及剩余磁感应强度; 内、外驱动器间的转差角; 内、外驱动器在径向和轴向的相对位置等.

首先应研究磁驱动力矩与各磁极参量的变化规律, 以便确定驱动器的合理结构, 使最终研制的驱动器即要有足够的空间包容人体和作相宜的姿态调整, 又要有足够的磁场强度驱动胶囊机器人在体内完成医疗作业.

为了进行试验研究, 研制了一种外驱动器和两种内驱动器, 外驱动器磁环径向厚度 $h=5\text{ mm}$, 内、外驱动器径向间隙 $g=45.25\text{ mm}$. 主要尺寸与性能参数如表 1 所示, 内驱动器 1 仅用来进行仿真研究, 内驱动器 1 和 2 均用来进行试验研究.

表 1 内、外驱动器的参数

驱动器	参数	符号	值	单位
内驱动器 A	表面 3 的曲率半径	R_3	2	mm
	表面 4 的曲率半径	R_4	0	mm
	内驱动器的长度	l_2	42	mm
	剩余磁通密度	B_{r1}	1.1	T
内驱动器 B	表面 3 的曲率半径	R_3	5	mm
	表面 4 的曲率半径	R_4	0	mm
	内驱动器的长度	l_2	42	mm
	剩余磁通密度	B_{r1}	1.1	T
外驱动器	表面 1 的曲率半径	R_1	55.25	mm
	表面 2 的曲率半径	R_2	50.25	mm
	外驱动器的长度	l_1	117	mm
	剩余磁通密度	B_{r2}	1.1	T

3.1 磁驱动转矩与磁极数 n 的关系

首先分析磁极数 n 与磁驱动转矩的关系特性. 研究表明, 磁极数 n 对磁驱动力矩的影响较大, 分别取 $n=2, 4, 6$ 时, 由(8)式可得磁力矩与转角差关系曲线如图 5 所示, 可见在其它参数不变的情况下, 随着转角差的增大, 磁驱动力矩随着磁极数的增多而减小,

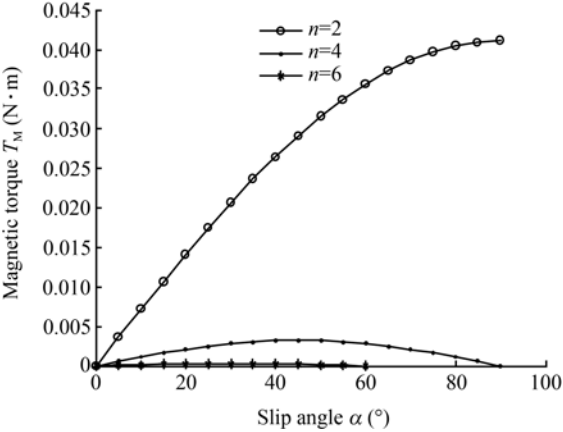


图 5 磁极数对磁驱动转矩的影响

因此对大间隙情形, 选取少磁极数为宜. 结合实际, 外驱动器属于大间隙情形, 故选择 $n=2$.

3.2 磁驱动力矩与径向偏移量 e 的关系

径向偏移量 e 是微机器人轴线与外驱动器轴线在径向的位移, 试验表明在机器人启动或者转速较低的情况下, 偏移距离对机器人的稳定性存在明显的影响. 当内、外驱动器转角差 α 为 $20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 时, 磁驱动力矩与偏移距离的仿真关系曲线如图 6 所示.

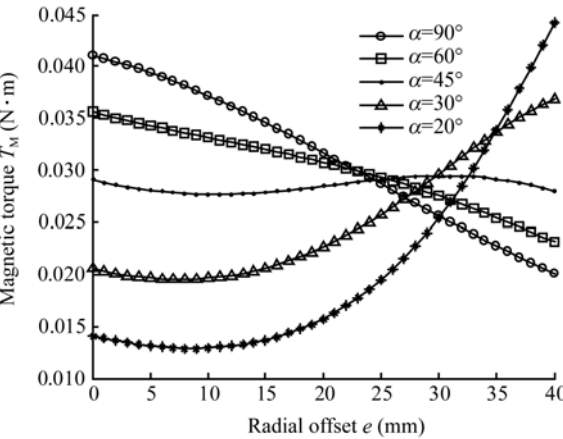


图 6 磁驱动转矩与径向偏移量 e 的关系

可见, 当 $\alpha=45^\circ$ 时, 磁驱动转矩与径向偏移量 e 的关系曲线波动不大, 趋于恒定值, 以 $\alpha=45^\circ$ 时的关系曲线为界, 当 $\alpha<45^\circ$ 时, 驱动力矩随着偏移量 e 的增加先略减小后再大幅增加; 当 $\alpha>45^\circ$ 时, 驱动力矩随着偏移量 e 的增加而大幅减小. 故可得结论如下: 当驱动器磁极数为 n , 转差角 $\alpha=180^\circ/n$ 时, 磁驱动转

矩与径向偏移量 e 的关系曲线趋于恒定值; 当 $\alpha < 180^\circ/n$ 时, 驱动力矩随着偏移量 e 的增加先略减小后再大幅增加, 径向偏心不会出现机器人驱动力矩不足的现象; $\alpha > 180^\circ/n$ 时, 驱动力矩随着偏移量 e 的增加而大幅减小, 偏心较大时, 会出现机器人驱动力矩不足的现象, 应使机器人尽量处于外驱动器轴心线附近。

3.3 磁驱动力矩与转角差 α 的关系

转角差 α 是影响磁驱动力矩的一个主要因素, 对两磁极相邻异向磁化驱动器, 转角差 α 的变化范围是 $[0^\circ, 180^\circ]$, 当内、外驱动器的径向偏移距离 e 分别为 0 mm, 10 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm 时, 做出的磁驱动力矩与转角差的变化曲线如图 7 所示。

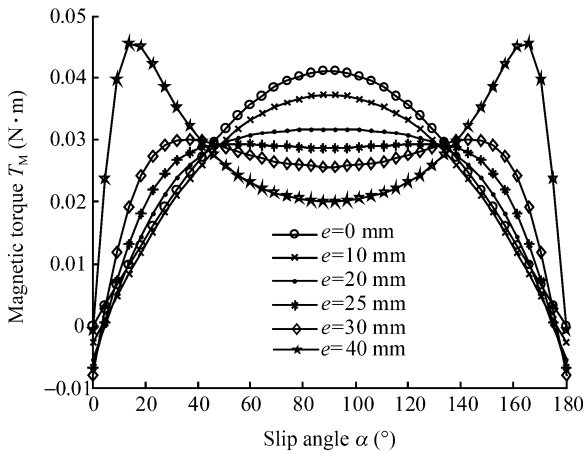


图 7 转角差对磁驱动转矩的影响

可见, 当 $e < g/2$ 时, 磁驱动力矩在 $\alpha = 90^\circ$ 时达到最大值; 当 $e = g/2$ 时, 在 $[45^\circ, 135^\circ]$ 区间内, 磁驱动力矩出现一段恒定区域, 此范围内, 磁驱动力矩受转角差的影响不大; 当 $e > g/2$ 时, 在 $[45^\circ, 135^\circ]$ 区间内, 磁驱动力矩曲线开始下凹, 在 $\alpha = 90^\circ$ 时达到最小值, 在 $[45^\circ, 135^\circ]$ 区域外, 磁力矩在一个周期内出现两次相同的最大值, 这两个极值点关于过横轴 90° 处的纵坐标轴对称, 并且曲线在 $\alpha = 45^\circ$ 和 $\alpha = 135^\circ$ 处出现两个拐点。

因此得出如下结论: 当偏移距离 $e > g/2$ 时, 驱动力矩会出现双波峰的不稳定现象。因此胶囊机器人的径向偏移距离应该保证 $e < g/2$; 当偏心距离为零时, 当转角差为驱动器每个磁极圆心角的一半时, 内、外驱动器产生的磁力矩最大。对双磁极情形, 最大磁驱

动力矩出现在 $\alpha = 90^\circ$ 处; 当 $\alpha > 90^\circ$ 时, 胶囊机器人将因磁驱动力矩不足而出现丢步现象。

外驱动器静止时, 外驱动器的 N 极和 S 极分别与内驱动器的 S 极和 N 极正对, 转角差 $\alpha = 0^\circ$, 磁驱动转矩为零; 外驱动器旋转时, 驱动力矩可以根据负载的大小通过转角差 α 进行自适应调整, 达到驱动力矩与阻力矩的平衡, 最终内、外驱动器以一定转角差 α 带动内驱动器同步旋转。

3.4 磁驱动转矩与间隙 g 的关系

当径向偏移距离 e 分别为 0 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm 时, 作出磁驱动力矩与径向间隙 g 的变化曲线, 如图 8 所示。

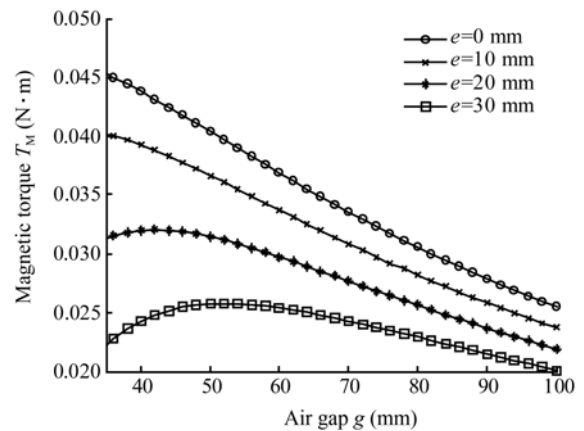


图 8 磁驱动转矩与间隙 g 的关系

可见, 当径向偏移距离 e 较大时, 磁驱动力矩随着径向间隙 g 的增大而逐渐增大, 当达到最大值以后, 又随着径向间隙的增大而减小, 随间隙的增加, 各曲线的力矩趋于一致。可见当间隙大时, 偏心距离对驱动力矩的影响不大。

4 试验

为了验证磁驱动力矩模型, 研制了磁场驱动装置与变径胶囊机器人样机。图 9 为研制的两磁极外旋转磁场装置与驱动力矩检测装置, 旋转磁场的转速通过变频调速来控制, 驱动器力矩检测装置是自行研制的多级放大机构检测装置。

进行试验的两组内动器参数如表 1 所示。采用上述装置进行了磁驱动转矩与转角差关系的检测试验

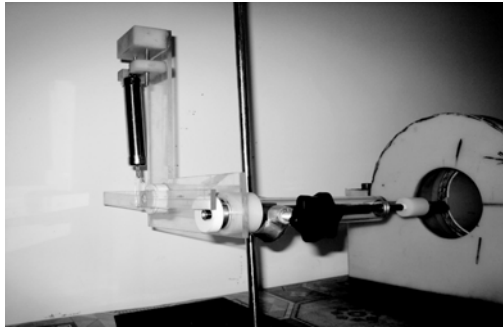


图 9 外旋转磁场装置与驱动力矩检测装置

和径向偏移距离对磁驱动转矩的影响试验,最后进行了变径胶囊机器人的游动试验.

转角差与磁驱动转矩的理论及试验关系曲线如

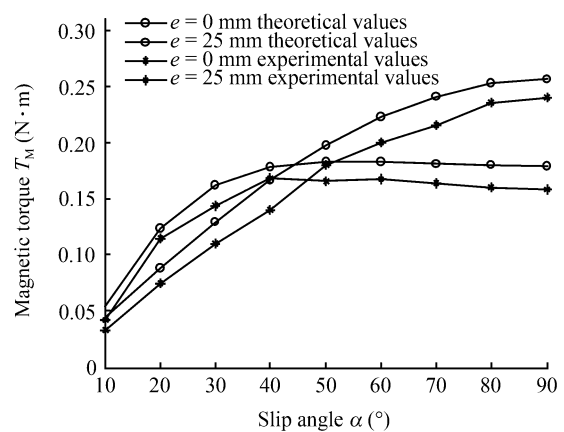
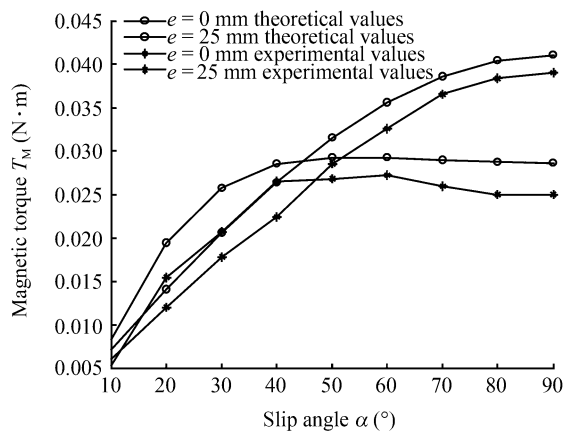


图 10 转角差与磁驱动转矩关系的试验曲线

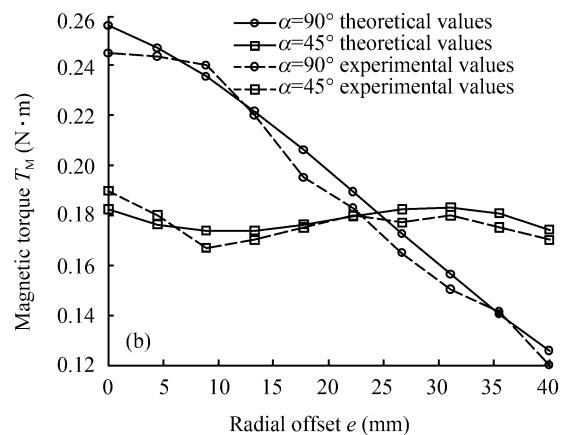
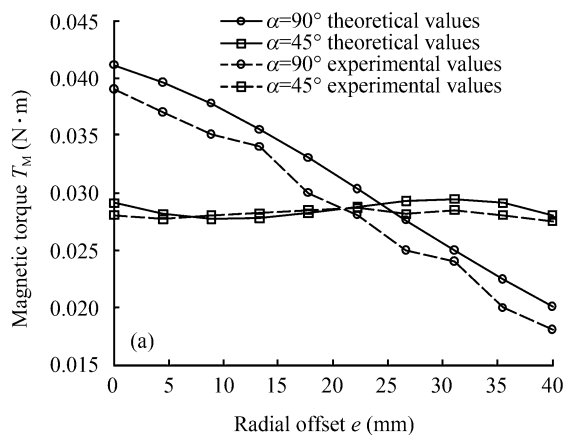


图 11 径向偏移距离对磁驱动转矩的影响

图 10 所示; 径向偏移距离与磁驱动转矩的理论及试验关系曲线如图 11 所示.

由试验可见, 两种情况下的理论计算与试验值吻合较好, 验证了基于等效磁荷法的存在偏心情形下的磁驱动转矩一般数学模型的正确性, 以该模型进行分析比有限元法更简单易行、计算效率高, 也更能直观地发现磁驱动力矩与磁极结构的关系特性^[10,11].

最后, 选用离体猪大肠一段, 将机器人放入大肠中进行行走试验, 如图 12 所示. 当调节转速在 1000 r/min 左右时, 微机器人径向初始间隙由 4 mm 减小到 2 mm 左右, 微机器人能顺利地在猪大肠中水平与垂直行走, 垂直行走速度大约为 20 mm/s. 试验表明研制的磁场系统可以提供足够的驱动力矩.



(1) 变径胶囊机器人与猪离体肠道

(2) 垂直行走试验

图 12 变径胶囊机器人在离体猪大肠中的行走试验

5 结论

本文提出一种径向相邻异向磁化瓦状多磁极圆筒为外驱动器产生旋转磁场驱动内嵌同磁极内驱动器的变径胶囊式微机器人的驱动控制方法, 依据等效磁荷法建立了偏心状态下普遍性磁驱动力矩数学模型, 研究了磁驱动力矩与结构参数的关系特性, 在水平和垂直放置的猪肠道内, 对变径胶囊机器人进行了游动试验, 表明研制的磁场系统可以提供足够的驱动力矩驱动机器人在猪肠道内水平、垂直游动。该磁驱动系统安全可靠, 在人体肠道内具有良好的

应用前景。

本项研究为应用奠定了基础, 将来应进行如下研究工作。

1) 驱动器的结构参数的优化。就是设计一个结构参数优化的大尺寸外驱动器, 以便有足够的空间包围人体。

2) 机器人的姿态控制, 也就是使外驱动器具有两个自由度, 这样通过调整外驱动器的轴线与肠道不同弯曲段的方向一致, 就可以控制胶囊机器人沿着肠道的任何方向驱动行走。

参考文献

- 1 Arkady G, Harold J, Alexandra L, et al. Wireless capsule endoscopy. *Israel Med Assoc J*, 2002, 4(9): 717—719
- 2 Wang W. A study on RF based on wireless capsule endoscope. In: *Proceedings of ICMA*. Luoyang: IEEE, 2006. 1663—1667
- 3 付国强, 梅涛, 孔德义, 等. 无线微型机器人肠道内窥镜系统中图像采集与无线传输子系统的设计. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 614—618
- 4 Sendoh M, Ishiyama K, Arai K I. Direction and individual control of magnetic micro-machine. *J Magn Magn Mater*, 2002, 38(5): 3356—3358
- 5 Sendoh M, Suda Y, Ishiyama K, et al. Fabrication of Magnetic Actuator for Use in colon endoscope. In: *Proceedings of MHS2003*. Nagoya: IEEE, 2003. 165—170
- 6 张永顺, 张凯, 张林燕. 体内胶囊微型机器人的旋进驱动特性. *机器人*, 2006, 28(6): 564—570
- 7 Choi H S, Lee S H, Park I H. General formulation of equivalent magnetic charge method for force density distribution on interface of different materials. *IEEE T Magn*, 2005, 41(5): 1420—1423[[doi](#)]
- 8 张永顺, 李治贵, 敬双萍, 等. 肠道胶囊式微机器人轴向磁拉力的研究. *中国机械工程*, 2006, 18(14): 1709—1719
- 9 谭庆昌, 刘明洁, 孟慧琴, 等. 永磁向心轴承承载能力与刚度的计算. *摩擦学报*, 1994, 14(4): 337—344
- 10 奥汉德利. 现代磁性材料原理和应用. 北京: 化学工业出版社, 2002. 85—88
- 11 徐游. 电磁学. 北京: 科学出版社, 2004. 95—99