

DOI: 10.3901/JME.2014.17.001

三维梯度旋转磁场内胶囊机器人磁力^{*}

张永顺 徐长亮 迟明路 白建卫 程存欣
(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116024)

摘要: 建立三维空间梯度旋转磁场内胶囊机器人的磁力模型, 采用截面法研究梯度磁场内磁力的大小与方向特性, 分析梯度场内磁力对机器人运动的影响, 采用永磁体对磁力方向性进行验证, 并采用胶囊机器人对该磁力进行定量分析, 结果表明机器人所受磁力的大小和方向与磁场区域相关, 研究结果可以解释试验中出现的机器人停滞不前、倒退和振动等现象, 梯度磁场拉力特性的研究对进一步提高胶囊机器人的驱动性能具有一定的参考价值。

关键词: 胶囊机器人; 万向旋转磁场; 梯度磁场; 磁力特性

中图分类号: TP242

Magnetic Force on Capsule Robot in Three-dimensional Rotating Magnetic Field with Gradient

ZHANG Yongshun XU Changliang CHI Minglu BAI Jianwei CHENG Cunxin
(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: A magnetic force model of a capsule robot in three-dimensional spatial rotating magnetic field with gradient is proposed. The magnitude and direction of the magnetic force are investigated employing the section across the spatial rotating magnetic field, and the influence on the motion of the robot originated from the magnetic force is analyzed. The directivity of the magnetic force is verified using a permanent magnet, and the quantity of the magnetic force is tested using a spiral robot. Experimental results show that the magnitude and direction of the magnetic force are related to different location of the magnetic field. The experimental phenomena such as stagnation, retrogression and vibration happens to the capsule robot can be explained by the experimental results, the characteristics of the magnetic force generated by the spatial rotating magnetic field with gradient may have reference value for further improving the drive performance of the robot.

Key words: capsule robot; universal rotating magnetic field; gradient magnetic field; characteristics of magnetic force

0 前言

基于体内无创介入诊疗技术的胶囊内窥镜相继用于胃肠道诊断等临床应用, 由于胶囊内窥镜依靠肠道蠕动被动行走, 因此运动与姿态不可控, 不能完成特定位置的窥视与诊疗, 制约了胶囊内窥镜的临床效果与功能扩展^[1-3]。

无缆式自主机器人具有安全、实用、可操作性好等特点, 可望完成胶囊内窥镜的主动驱动, 并成为胶囊机器人发展的主流^[4-5]。

胶囊机器人已有一些研究成果。受自然界中蚯蚓、尺蠖等动物行走方式的启发, 韩国 KIM 等^[6]研制了一种采用形状记忆合金弹簧作为驱动器的仿蚯蚓微型机器人; 意大利 PHEE 等^[7]提出一种气动式仿尺蠖微型机器人; QUIRINI 等^[8]提出一种内置无刷直流微型电动机驱动 12 条超弹性腿式机构的足驱式微型机器人; STEFANING 等^[9]研制出一种多腿式机器人, 通过两根形状记忆合金细线的伸缩带动滑轮和单个腿部的旋转实现机器人的运动; YIM 等^[10]使用一个外部永磁体牵引内嵌于机器人的小型永磁体, 实现了柔软型胶囊机器人在人工合成的胃部表面的翻转运动; 意大利 CARPI 等^[11-12]

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (60875064, 61175102, 51277018)。
20130917 收到初稿, 20140520 收到修改稿

采用 Niobe Stereotaxis 磁导航系统产生方向可调的恒定磁场导引机器人在胃肠道内实现准确操纵与三维定位；日本 SENDOH 等^[13]提出用外部旋转磁场驱动内嵌径向磁化永磁体的螺旋状机器人旋转与前进。为实现胶囊机器人无缆驱动，我们提出并突破了空间万向旋转磁场技术，解决了胶囊机器人在肠道弯曲环境内驱动这一难题^[14]，并提出胶囊机器人的多楔形效应驱动原理，结果表明，多楔形效应胶囊机器人可以显著提高流体动压力、管径自适应性和驱动能力。旋转磁场与机器人内嵌径向磁化永磁体耦合产生旋转磁力矩实现了螺旋机器人在液体内的旋进，研究中我们发现胶囊机器人在三维旋转磁场的特定区域内低频旋进时，会出现沿轴线倒退现象，为此，本文通过三轴亥姆霍兹线圈磁场梯度特性的分析，研究了机器人在旋转梯度磁场内磁力大小与方向特性及对机器人运动状态的影响，结果表明旋转梯度磁场内磁力是机器人倒退的主要原因，并进行了试验验证。

1 三维空间旋转磁场梯度

磁场梯度是描述磁场强度随特定空间变化的物理量，三轴亥姆霍兹线圈磁场强度分布的研究比较成熟，但很少涉及磁场梯度的研究。梯度磁场应用广泛，如高梯度磁场可用于选矿和磁性药物的靶向运输及构件的无损检测^[15]，为了研究亥姆霍兹线圈磁场梯度对机器人的磁力作用情形，改善其应用效果，有必要分析磁场梯度的特性。

磁场梯度是磁场强度随空间位移的变化率，用符号 \mathbf{dB}/\mathbf{dr} 表示。磁场梯度解析式为

$$\nabla B = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{x}_0 + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{y}_0 + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{z}_0 \right) B = \frac{\partial B}{\partial x} \mathbf{x}_0 + \frac{\partial B}{\partial y} \mathbf{y}_0 + \frac{\partial B}{\partial z} \mathbf{z}_0 \quad (1)$$

可求得三维旋转磁场空间内任一点 P 处的磁场强度^[16]： $B(P) = \sqrt{B(P)_x^2 + B(P)_y^2 + B(P)_z^2}$ ， $B(P)$ 对 x 求偏导可得

$$\frac{\partial B(P)}{\partial x} = \left[B(P)_x \frac{\partial B(P)_x}{\partial x} + B(P)_y \frac{\partial B(P)_y}{\partial x} + B(P)_z \frac{\partial B(P)_z}{\partial x} \right] / \sqrt{B(P)_x^2 + B(P)_y^2 + B(P)_z^2} \quad (2)$$

同理，可得 $\frac{\partial B(P)}{\partial y}$ 和 $\frac{\partial B(P)}{\partial z}$ 。因此，磁场中任

意一点 P 处的磁场梯度矢量表示为

$$\nabla B(P) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{x}_0 + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{y}_0 + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{z}_0 \right) B(P) = \frac{\partial B(P)}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial B(P)}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial B(P)}{\partial z} \mathbf{k} \quad (3)$$

2 磁场梯度与磁力

2.1 磁力模型

三维旋转磁场内存在磁场梯度，机器人内嵌的径向磁化的 NdFeB(钕铁硼)永磁体的磁矩为 \mathbf{m} ，永磁体在磁场梯度作用下产生磁力 \mathbf{F} 的表达式为^[17]

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}) = (\mathbf{m} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{pmatrix} (m_x \quad m_y \quad m_z)^T \quad (4)$$

式中， $\mathbf{B} = B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k}$ ， $\mathbf{m} = m_x \mathbf{i} + m_y \mathbf{j} + m_z \mathbf{k}$ ，进而可得

$$\mathbf{F} = \left(\frac{\partial B_x}{\partial x} \cdot m_x + \frac{\partial B_x}{\partial y} \cdot m_y + \frac{\partial B_x}{\partial z} \cdot m_z \right) \cdot \mathbf{i} + \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} \cdot m_x + \frac{\partial B_y}{\partial y} \cdot m_y + \frac{\partial B_y}{\partial z} \cdot m_z \right) \cdot \mathbf{j} + \left(\frac{\partial B_z}{\partial x} \cdot m_x + \frac{\partial B_z}{\partial y} \cdot m_y + \frac{\partial B_z}{\partial z} \cdot m_z \right) \cdot \mathbf{k} \quad (5)$$

在三轴亥氏线圈中，机器人磁矩 \mathbf{m} 的方向始终位于磁场 \mathbf{B} 的旋转平面 H 内，建立磁场旋转平面坐标系 $ox'y'z'$ ，其中 oz' 轴垂直于磁场旋转平面， ox' 和 oy' 轴位于旋转平面 $ox'y'$ 内。固定坐标系 $oxyz$ 与旋转坐标系 $ox'y'z'$ 的相对位置关系以及机器人在梯度磁场内的受力如图 1 所示。在梯度磁场中，机器人受到沿 z' 的轴向力 F_z 及沿 $ox'y'$ 平面的侧向力 $F_{x'y'}$ 作用。

为了在旋转平面内计算磁力分量 F_z 和 $F_{x'y'}$ ，需要得到旋转平面坐标系与固定坐标系的变换关系。确定坐标系 $ox'y'z'$ 仅需 α' 和 β' 两个角度：初始时， $ox'y'z'$ 与固定坐标系 $oxyz$ 重合，先绕 oy 轴转过 α' 角度，再绕 ox' 轴转过 $-\beta'$ 角，便可确定旋转平面坐

标系位置。依据以上变换过程得坐标系 $oxyz$ 到 $ox'y'z'$ 的齐次变换矩阵 0_1P 为

$${}^0_1P = \text{rot}(y, \alpha') \text{rot}(x, -\beta') = \begin{pmatrix} \cos \alpha' & 0 & \sin \alpha' \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha' & 0 & \cos \alpha' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta' & \sin \beta' \\ 0 & -\sin \beta' & \cos \beta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha' & -\sin \alpha' \sin \beta' & \sin \alpha' \cos \beta' \\ 0 & \cos \beta' & \sin \beta' \\ -\sin \alpha' & -\cos \alpha' \sin \beta' & \cos \alpha' \cos \beta' \end{pmatrix} \quad (6)$$

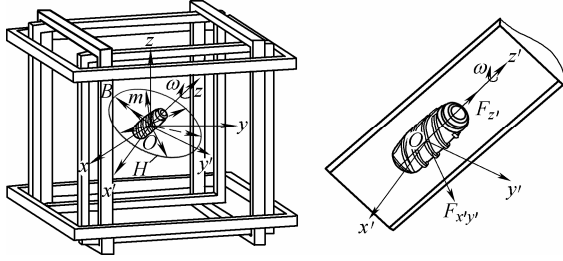


图1 机器人在三轴线圈梯度磁场内的受力

空间旋转磁场旋转轴的单位方向矢量在 $oxyz$ 坐标系可表示为 $n_B = (\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$, 其中 α 、 β 、 γ 分别为方向矢量 n_B 与 x 、 y 、 z 轴的夹角; 在旋转平面坐标系 $ox'y'z'$ 内表示为 $n_{B1} = (0, 0, 1)$, n_B 与 n_{B1} 的关系如下

$${}^0_1P \cdot n_{B1} = n_B \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \sin \alpha' \cos \beta' \\ \sin \beta' \\ \cos \alpha' \cos \beta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{pmatrix}$$

求解得

$$\begin{cases} \alpha' = \arcsin\left(\frac{\cos \alpha}{\cos \beta'}\right) \\ \beta' = \arcsin(\cos \beta) \end{cases} \quad (8)$$

已知旋转磁场的方位, 便可确定旋转平面坐标系。

2.2 磁力特性

本文所选用的 NdFeB 永磁体牌号为 N50, 其性能指标如表 1 所示。

表 1 N50 NdFeB 永磁体材料参数

最大磁能积	内秉矫顽力	剩磁	密度	磁矩
$BH_{\max}/(\text{kJ}/\text{m}^3)$	$H_{cj}/(\text{kA}/\text{m})$	B_r/T	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$m/(\text{A} \cdot \text{m}^2)$
400	876	1.46	7.55	0.345 78

为便于观察磁场旋转平面内各点的磁力分布, 需要沿旋转磁场法线方向对磁场均匀区域进行观测。为使选取的区域不超出线圈范围, 在 oxy 平面

内选取方形计算区域 $abcd$, 然后将其投影到磁场旋转平面上即得到观测区域 $a'bc'd'$, 亦即数值分析区域, 如图 2 所示。

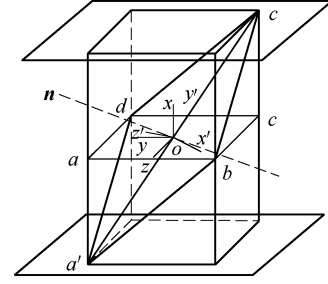


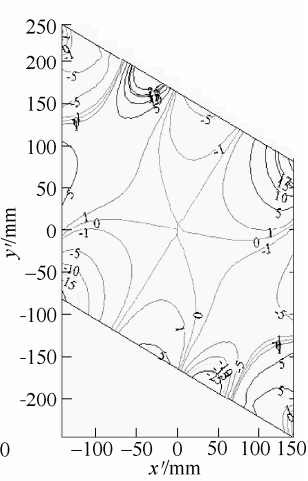
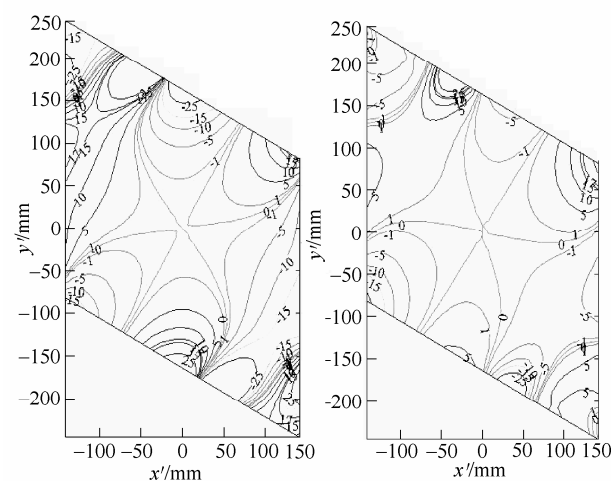
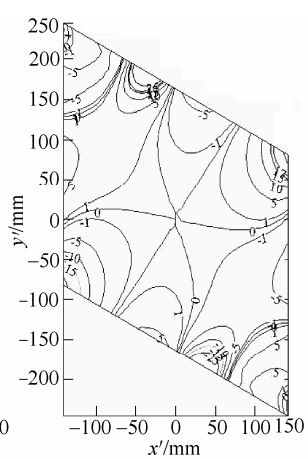
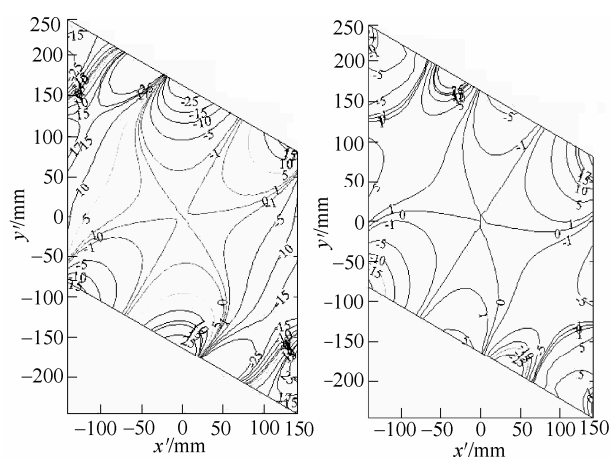
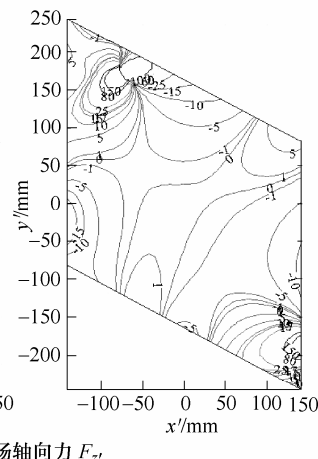
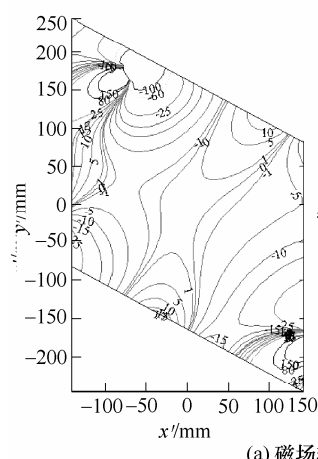
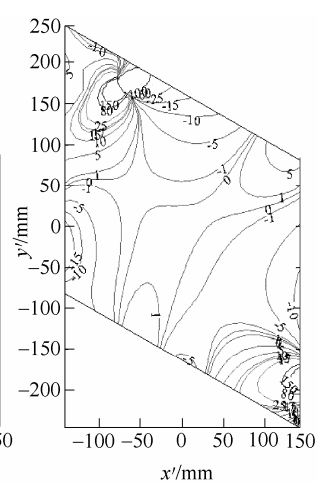
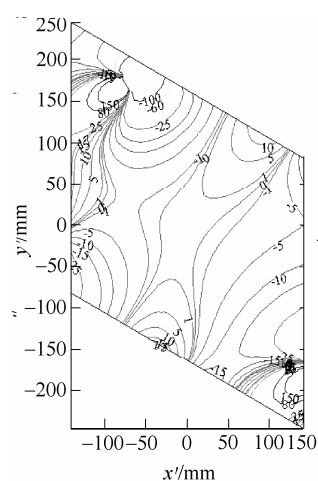
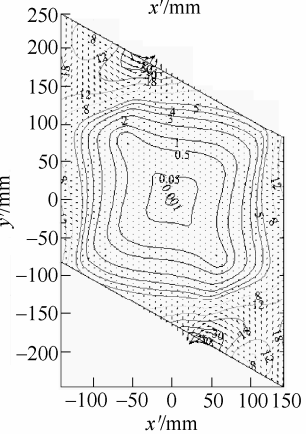
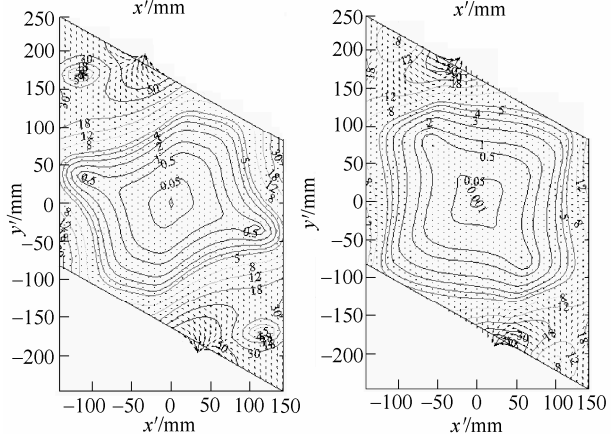
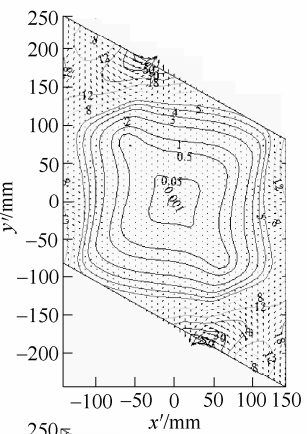
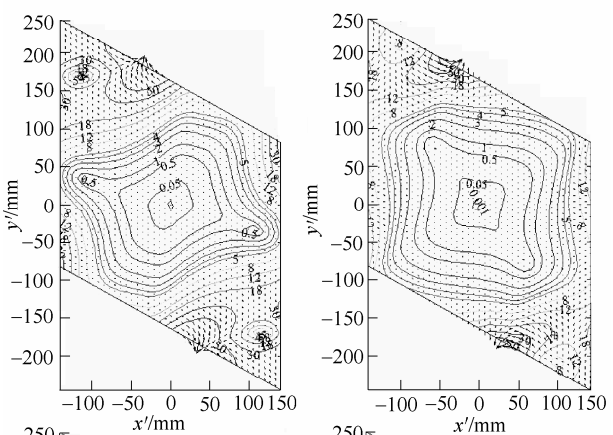
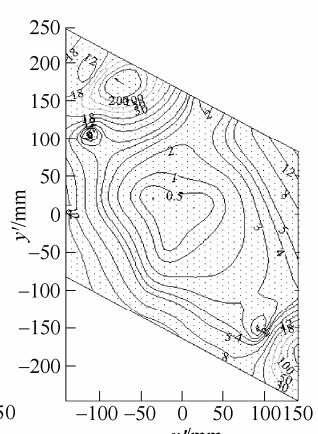
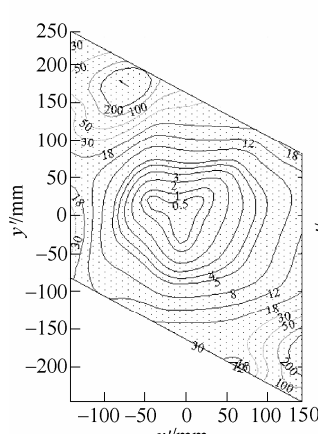
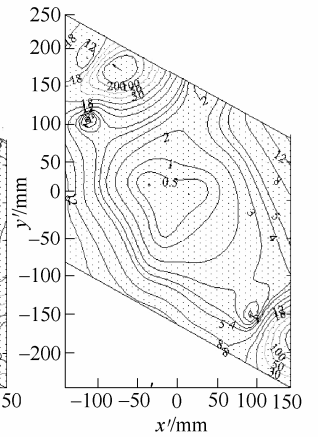
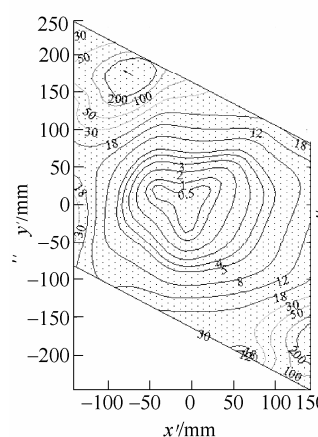
图2 磁场观测平面

以下计算机器人在三轴亥姆霍兹线圈磁场中各点受到的磁力分量。当磁场旋转轴线为 $(54.73^\circ, 54.73^\circ, 54.73^\circ)$, 且磁场旋转平面为 $z'=0$ 时, 不同时刻 ($t=0 \text{ s}, 0.020 \text{ s}, 0.041 \text{ s}, 0.062 \text{ s}$) 机器人受到的轴向磁力和侧向磁力的瞬时分布如图 3 所示; 磁场旋转轴线为 $(54.73^\circ, 54.73^\circ, 54.73^\circ)$, 磁场旋转平面为平面 $z'=0.05 \text{ m}$ 时, 沿机器人轴向磁力 F_z 和侧向磁拉力 $F_{x'y'}$ 的瞬时分布如图 4 所示。

综上所述, 磁场旋转平面通过三轴线圈中心时, 中心点附近区域 F_z 和 $F_{x'y'}$ 几乎为零, 远离中心 (亦即靠近线圈导线) 时机器人所受两磁力分量均增大 (图 3a); 旋转平面远离线圈中心时, 如在 $z'=0.05 \text{ m}$ 平面内 (图 4), 两磁力分量均增大; 在一个磁场旋转周期内, 各点磁力分量的大小和方向均呈周期性变化。

在 xoy 平面内, 距离磁场中心 0.09 m 的位置, 磁场最大轴向拉力 F_z 可达 1 mN ; 管道直径为 15.6 mm , 机器人直径 13 mm , 机器人在旋转频率为 1.5 Hz 时, 旋进过程中产生的流体推力 F_a 为 1.2 mN , 其数值与磁力数量级相同。因此试验中的机器人会出现倒退现象: 施加外磁场后, 若机器人受到的反向磁力大于液体推力, 机器人则出现后退现象; 若机器人所受的反向磁力等于液体推力时, 机器人会空转不前。而磁力分量 $F_{x'y'}$ 会引起机器人侧向振动, 降低了机器人姿态与位置控制的准确性^[18]。

增大机器人的旋转速度可提高流体的轴向推力 F_a , 而机器人所受磁力与磁场频率 f 无关, 即 F_z 恒定不变, 因此, F_a 可克服磁力使机器人沿旋转轴线方向行走更远的距离。此外, 频率 f 的增大可以改善机器人的陀螺稳定性, 削弱了磁力分量 $F_{x'y'}$ 对机器人稳定性的影响。

(a) 磁场轴向力 F_z (a) 磁场轴向力 F_z (b) 磁场侧向力 $F_{x'y'}$ (b) 磁场侧向力 $F_{x'y'}$ 图 3 平面 $z=0$ 内机器人所受磁力 F_z 和 $F_{x'y'}$ 的分布图 4 平面 $z=0.05$ 内机器人所受磁力 F_z 和 $F_{x'y'}$ 的分布

3 试验

为了验证梯度磁力的作用, 在有机玻璃管中进行了驱动试验。选择磁场旋转轴线方向为 $(90^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$, 分别采用表面光滑的径向磁化的 NdFeB 永磁体和带螺旋肋的机器人进行磁力试验, 首先通过永磁体对磁场拉力的方向性进行定性分析, 然后通过螺旋机器人对磁场拉力的大小和作用过程进行定量研究, 如图 5 所示。

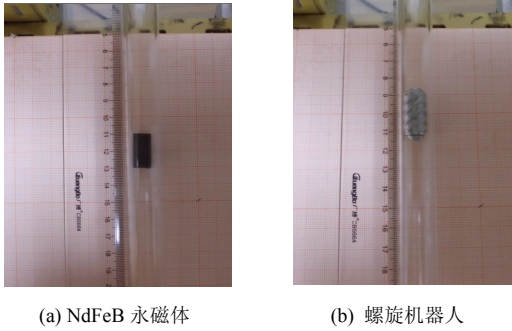


图 5 三维梯度磁场磁力试验

将 NdFeB 永磁体和螺旋胶囊机器人分别放入到充满硅油的有机玻璃管中, 管径为 15.6 mm, 机器人直径 13 mm, 使有机玻璃管通过三轴线圈中心点并与旋转磁场的轴线平行, 然后施加轴线为 $(90^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$ 的旋转磁场, 可得如图 6 所示的试验现象。

图 6 中, F_z 表示永磁体(螺旋机器人)受到的轴向磁力, v 表示永磁体(螺旋机器人)的速度, F 为螺旋机器人受到的合力, 平面 I 通过线圈中心并与磁场旋转平面垂直。永磁体旋转过程中仅受磁力作用, 如图 6a, 永磁体位于平面 I 下方时所受到的磁力沿 x 轴正方向, 当运动至平面 I 时, 永磁体受到的磁拉力为零, 此时永磁体达到力平衡状态, 轴向运动停止; 永磁体处于平面 I 的上方时所受到的磁力沿 x 轴负向, 永磁体运动到平面 I 时达到力平衡。

如图 6b, 螺旋机器人位于平面 I 的下方时, 同时受到沿 x 轴正向的液体推动力 F_a 和磁力 F_z 的作用, 机器人沿 x 轴正向运动; 螺旋机器人运动到平面 I 时, 机器人仅受 F_a 的作用, 其所受合力 F 沿 x 轴正向, 机器人运动方向不变; 机器人运动至平面 II 时, 受到沿 x 轴正向的流体推力 F_a 和沿 x 轴负向的磁力 F_z 的作用, 且合力 $F=0$, 机器人速度为零; 机器人运动至平面 II 上方时, 受到沿 x 轴负向的磁力 F_z 大于沿 x 轴正向的流体推力 F_a , 则合力 F 沿 x 轴负向, 机器人倒退。

永磁体和机器人在运动过程中受到的磁力 F_z , 机器人所受到的液体推动力 F_a 及合力 F 的变化规律如图 7 所示, 在平面 I 的左侧区域, 永磁体向前运动, 在平面 I 的右侧区域, 永磁体后退; 在平面

II 的左侧, 机器人后退, 而在平面 II 的右侧, 机器人则前进。

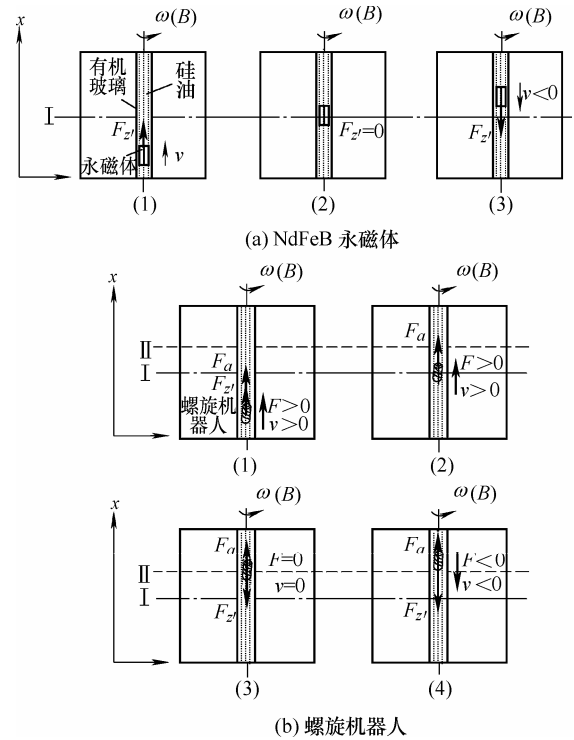


图 6 三维梯度磁场内不同位置的受力分析

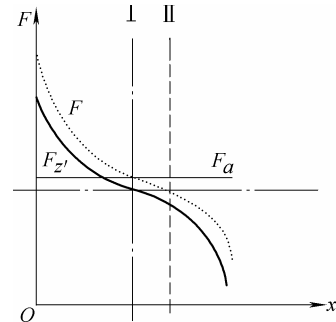


图 7 永磁体和机器人在不同区域的受力及运动状态

机器人在不同频率下从线圈中心点向线圈边界驱动试验过程中, 机器人可驱动的最远距离如图 8 所示。可见, 随着驱动频率的增大, 机器人产生的流体推力也会增大, 机器人移动的距离也增大, 并与梯度场的磁力建立新的平衡。

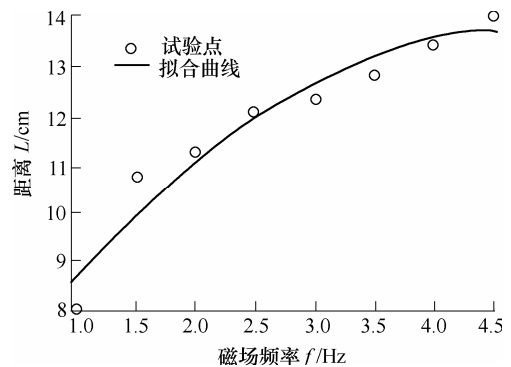


图 8 机器人在不同旋转频率下的驱动距离

4 结 论

三轴亥姆霍兹线圈产生的空间万向旋转磁场存在梯度, 梯度磁场对内嵌永磁体胶囊机器人产生的磁力具有方向性, 并指向线圈中心; 离线圈中心点越远, 磁场梯度越大, 磁作用力也越大, 参考机器人的运动方向, 该磁力会影响机器人的运动状态, 通过研究得出如下结论。

(1) 机器人处于中心点后部区域时, 磁作用力与运动方向相同, 有助于机器人的运动; 反之, 磁作用力会阻碍机器人的运动, 甚至会出现停滞不前与倒退现象。

(2) 增大机器人的旋转速度, 流体产生的推力增加, 可以有效地克服磁力对机器人运动的影响。

(3) 旋转速度的增大使机器人的陀螺稳定性增加, 可以有效地削弱磁力对机器人稳定性的影响。

未来研究中可充分利用磁场梯度特性, 使流体推力和梯度磁力共同推动的机器人与磁耦合力矩合成为“力旋”, 进一步提高机器人在肠道内的驱动能力。

参 考 文 献

- [1] IDAN G, MERON G, GLUKHOVSKY A, et al. Wireless capsule endoscopy[J]. Nature, 2000, 405: 417.
- [2] MIGUEL M. Capsule endoscopy[J]. World Journal of Gastroenterology, 2009, 15(13): 1584-1586.
- [3] MOGLIA A, MENCIASSI A, SCHURR M O, et al. Wireless capsule endoscopy: From diagnostic devices to multipurpose robotic systems[J]. Biomedical Microdevices, 2007, 9(2): 235-243.
- [4] WANG Xiaona, MENG M Q H. Perspective of active capsule endoscope: Actuation and localisation[J]. International Journal of Mechatronics and Automation, 2011, 1(1): 38-45.
- [5] ZHANG Yongshun, WANG Na, DU Chunyu, et al. Control theorem of a universal uniform-rotating magnetic vector for capsule robot in curved environment[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(2): 359-368.
- [6] KIM B, LEE S, PARK J H, et al. Design and fabrication of a locomotive mechanism for capsule-type endoscopes using shape memory alloys(SMAs)[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(1): 77-86.
- [7] PHEE L, ACCOTO D, MENCIASSI A, et al. Analysis and development of locomotion devices for the gastrointestinal tract[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2002, 49(6): 613-616.
- [8] QUIRINI M, MENCIASSI A, SCAPELLATO S, et al. Design and fabrication of a motor legged capsule for active exploration of the gastrointestinal tract[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(2): 169-179.
- [9] STEFANINI C, MENCIASSI A, DARIO P. Modeling and experiments on a legged microrobot locomoting in a tubular, compliant and slippery environment[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(5-6): 551-560.
- [10] YIM S, SITTI M. Design and rolling locomotion of a magnetically actuated soft capsule endoscope[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(1): 183-194.
- [11] CARPI F, KASTELEIN N, TALCOTT M, et al. Magnetically controllable gastrointestinal steering of video capsules[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(2): 231-234.
- [12] CARPI F, PAPPONE C. Magnetic maneuvering of endoscopic capsules by means of a robotic navigation system[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2009, 56(5): 1482-1490.
- [13] SENDOH M, ISHIYAMA K, ARAI K I. Fabrication of magnetic actuator for use in a capsule endoscope[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 3232-3234.
- [14] ZHANG Yongshun, JIANG Shengyuan, ZHANG Xuewen, et al. A variable-diameter capsule robot based on multiple wedge effects[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(2): 241-254.
- [15] 蹇兴亮, 周克印. 基于磁场梯度测量的磁记忆实验[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 15-21.
- [16] JIAN Xingliang, ZHOU Keyin. Magnetic memory experiment based on magnetic gradient measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 15-21.
- [17] ZHANG Yongshun, XIE Huaying, WANG Na, et al. Design, analysis and experiments of a spatial universal rotating magnetic field system for capsule robot[C]// 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), August 5-8, 2012, Chengdu, Sichuan. New Jersey: IEEE, 2012: 998-1003.

- [17] HYOUNG J C, CHONG H A. A bidirectional magnetic microactuator using electroplated permanent magnet arrays[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(1): 78-84.
- [18] FOUNTAIN T W R, KAILAT P V, Abbott J J. Wireless control of magnetic helical microrobots using a rotating-permanent-magnet manipulator[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 3-7, 2010, Anchorage, AK. New Jersey:

IEEE, 2010: 576-581.

作者简介：张永顺，男，1965 年出生，博士，教授，博士研究生导师。
主要研究方向为机器人机电一体化技术、医疗微型机器人。

E-mail: zysun@dlut.edu.cn

徐长亮，男，1986 年出生。主要研究方向为空间万向旋转磁场驱动控制技术
技术及理论。

E-mail: xuchnliang@sina.com



国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目简介

新型五坐标混联动力头设计理论与关键技术研究*

项目负责人：宋轶民(E-mail: ymsong@tju.edu.cn)

依托单位：天津大学

项目批准号：51075295

1. 项目简介

飞机制造业是拉动国民经济快速增长、保持国家军事威慑力与国际影响力的战略性产业。航空铝合金整体结构件具有结构复杂、薄壁易变形、金属切除率高等特点，必须采用五轴联动高效加工装备制造。与国际先进水平相比，目前国产装备的结构技术、工件规格及加工效率等均存在阶段性差距。面向国家飞机制造业的重要需求，本项目系统研究了一种新型五坐标混联动力头的设计理论与方法，内容涉及机械结构创新设计、运动学设计、静刚度设计、弹性动力学设计、精度分析，以及基于该动力头的大型结构件高效加工单元整体布局设计等。在此基础上，深入研究了物理样机建造、数控系统开发、运动学标定及静/动态性能测试等关键技术，研制成功新型五坐标混联动力头原型样机 1 台，经检测综合性能优良。本项目的研究工作为开发具有我国自主知识产权的大型铝合金整体结构件高效加工装备奠定了理论与技术基础。

2. 主要创新点及其主要研究进展

以天津大学发明的新型五坐标混联动力头 Tricept-IV 为典型对象，深入研究其恰约束主动支链 UPP 的机械结构实现技术，提出了以该动力头为核心功能部件的大型结构件高效加工单元的整体布局方案；兼顾静刚度性能需求，提出了一种基于工作空间划分的主进给模块尺度综合方法，实现了 Tricept-IV 动力头的运动学设计；提出了一种较为准确的滚动轴承刚度参数辨识方法，完成了 Tricept-IV 动力头的静刚度分析与优化设计；建立了 Tricept-IV 动力头的弹性动力学模型，提出系统时/频域动态响应的快速求解方法，进而实现了动力头的轻量化设计；建立了 Tricept-IV 动力头的误差分析模型，提出了行之有效的精度补偿策略及零部件制造/装配工艺；开发出 Tricept-IV 动力头原型样机及其数控系统，并开展了样机综合性能测试实验研究。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上被评为优秀结题项目。