

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108416

胶囊机器人磁驱动力建模与测量^{*}

郭志明^{1,2}, 梁 亮¹, 蔺代永¹, 陈相位¹, 李 凯¹

(1. 长沙学院机电工程学院 长沙 410022; 2. 湖南大学机械与运载工程学院 长沙 410082)

摘 要:可吞式无线磁驱胶囊机器人在胃肠道内的诊疗效果与机器人受到的外部磁驱动力密切相关。本文建立了外部磁驱动力的理论模型,基于等效磁荷模型推导了两径向充磁环形永磁体相互作用的数学表达式,采用自适应递归式计算方法开展了数值计算。此外,发展了环形永磁体间磁力实时测量方法,并开发了磁力-间距同步测量仪器开展实验研究,且建立了 3D 环形永磁体有限元仿真模型。实验测量磁力-间距关系曲线与理论计算和有限元仿真结果吻合较好,误差小于 4%,验证了理论模型和有限元仿真模型的准确性和可靠性。通过参数分析,揭示了胶囊机器人内置永磁体长度、厚度和体积对磁力的影响规律。研究结果为精准驱动胶囊机器人在胃肠道内运动奠定了理论基础。

关键词:磁力建模与测量;胶囊机器人;磁荷模型;径向充磁;环形永磁体

中图分类号: TP242 TH113 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 80

Modeling and measurement of magnetic driving force in the capsule robot

Guo Zhiming^{1, 2}, Liang Liang¹, Lin Daiyong¹, Chen Xiangwei¹, Li Kai¹

(1. College of Electromechanical Engineering, Changsha University, Changsha 410022, China;

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The diagnosis and treatment effect of the swallowing wireless magnetic capsule robot in gastrointestinal tract is closely related to the external magnetic driving force of the robot. In this article, the theoretical model of external magnetic driving force is formulated. The mathematical expression of the interaction between two diametrical magnetizing ring permanent magnets is deduced which is based on the equivalent magnetic charge method. The numerical calculation is carried out by the adaptive recursive calculation method. In addition, a real-time measurement method of magnetic force between ring permanent magnets is developed, a magnetic-spacing synchronous measurement instrument is developed to carry out experimental research, and a finite element simulation model of 3D ring permanent magnets is formulated. The experimental measurement of the magnetic-spacing relationship is in good agreement with the theoretical calculation and finite element simulation results. The error is less than 4%, which verifies the accuracy and reliability of the theoretical model and the finite element simulation model. The influence of length, thickness and volume of embedded permanent magnet in the capsule robot on magnetic force is revealed by parameter analysis. The results provide a theoretical foundation for precise driving of capsule robot in gastrointestinal tract.

Keywords: modeling and measurement of magnetic force; capsule robot; magnetic charge model; diametrical magnetization; ring permanent magnet

0 引 言

消化道疾病发病率高,症状隐匿且治疗较难,严重威胁患者的经济和生活质量,特别是胃肠道恶性肿瘤和功

能性疾病,已成为了威胁人类健康的顽症,是当前国际社会关注的热点。无线胶囊内窥镜^[1]也称为胶囊机器人,是一种用于消化道疾病无创无痛诊断的新型设备,它能进入人体窥探胃肠道的健康状况,可用于人体胃肠道疾病早期发现和诊察,以提高疾病诊断和防治能力。胶囊

收稿日期:2021-08-15 Received Date: 2021-08-15

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(12002067, 51875051)、中国博士后科学基金(2021M690964)、湖南省教育厅科学研究项目(20C0173)资助

机器人具有介入程度低、病人无痛苦的特点,比传统导管式内窥镜更具优势,成为了消化道疾病诊断技术的重要发展方向^[2]。

胶囊机器人根据驱动方式可分为被动式和主动式,被动式胶囊机器人主要依靠自身重力和肠道蠕动在体内遍历检查区域,最终随排泄物排出,过程缓慢且易导致漏诊和误诊^[3]。而主动式胶囊机器人控制方法主要有两种驱动策略^[4],一种是将动力源与驱动部件集成在内窥镜胶囊上,使之形成一个微型机器人系统,这种策略的代表有仿生机器人法^[5]等。另一种策略是外部驱动策略,致力于开发体外驱动和控制设备引导胶囊机器人在患者胃肠道内运动和变换姿势。目前这种方法主要集中在磁场耦合驱动方式上^[6-7],包括旋转磁场联合螺旋结构驱动方式、梯度磁场驱动方式、准静态磁场驱动方式等。磁场控制法是利用外部磁场驱动胶囊机器人内的永磁体或线圈从而控制胶囊机器人的运动,具有可无线控制、无需内置电源^[8]及控制便捷简单等优点,姜萍萍等^[9]针对用于胃肠道微型机器人的组合螺旋管式无线能量发射系统开展了研究。为了最大限度地减少检查过程中对病患健康的影响,本文使用准静态磁场驱动,避免了交变磁场的不良影响以及梯度磁场复杂的电源设备。

目前临床的主动式无线胶囊机器人的外部磁场多以永磁体提供,具有体积小无能耗,驱动方式便捷易控等优点。外部驱动永磁体与胶囊机器人内置永磁体相互作用,驱动胶囊机器人在胃肠道中实现移动、旋转等多种定向运动,通过传输图像的方式,能对病灶实施长时间定点检查^[10],考虑到旋转驱动的特点,本文均采用径向充磁环形钕铁硼永磁体。所以,研究外部驱动永磁体和内置永磁体的磁力特征是实施胶囊机器人精准控制和理解驱动机理的重要基础。

永磁体(permanent magnets, PMs)之间的磁力特性在各个领域的应用越来越多,如磁驱动自组装^[11]、磁驱动微机器人^[12]、磁性机械、磁致动器^[13]等。通常磁力特性的获取主要有解析计算和有限元数值模拟两种方法,解析解的推导复杂,不利于工程应用,而有限元数值模拟在处理复杂结构三维问题上具有优势,但也存在计算成本高,耗时长等不足。在以往研究中,主要通过解析法计算两个立方体 PMs 之间的相互作用力,1984 年在德国汉堡举行的 INTERMAG 会议上首次提出^[14]。从平行磁化方向下两立方永磁材料的相互作用能出发,导出了相互作用力的解析模型。修世超等^[15]通过等效磁荷法建立了同轴环形磁铁相互作用力的计算表达式,磁化方向为轴向。Allag 等^[16]根据虚功原理和相互作用能发展了两个立方体 PMs 之间的相互作用力与力矩的解析表达式。Li 等^[17]结合等效电流和等效磁荷法建立了不同充磁方向圆柱的磁力、磁力矩模型,并通过辛普森方法开展了数

值计算。Qu 等^[18]通过实验、仿真和理论建模的方法研究了两立方体 PMs 的磁力特征,分析了几何参数和磁性参数的影响规律。此外,实验测量方面也开展了相关研究,Ye 等^[19]开发了微机控制的手持式执行器,测量了磁力和磁力矩,研究了外部旋转永磁体对螺旋型胶囊机器人的驱动机理和方法。郭志明等^[20]通过实验测量了胶囊机器人中径向磁化环形永磁体的磁场强度特征,为磁力建模奠定了基础。在多组永磁体间磁力实验研究中,大多采用静态测量,González 等^[21]通过称重实验法测量了两永磁体间磁力,并采用洛伦兹法建立了理论建模。

在上述磁力解析模型中,大多是立方体和轴向磁化的圆环,充磁方向与磁极面垂直,即磁化强度 $\boldsymbol{M}$ 与磁极面法向矢量 $\boldsymbol{n}$ 方向一致,此时等效面磁荷密度等于 $\boldsymbol{M}$ 。而胶囊机器人驱动模型中,是一个移动的径向充磁环形永磁体和一个静止的径向充磁环形永磁体在平行磁化方向上的相互作用,此时磁化强度与磁环外法向单位矢量方向成一夹角,且该夹角绕圆周变化,这就需要建立新的理论模型对磁力进行计算。同时,本文将发展环形永磁体磁力实时测量方法,开发专门磁力测量装置,采用 Maxwell 电磁仿真模块建立有限元模型,开展有限元仿真分析。研究结果将为解决磁控胶囊机器人精准控制问题和胃肠道检测核心技术提供重要参考。

本文第 1 节介绍胶囊机器人驱动原理和磁力建模,第 2 节基于等效磁荷法建立径向充磁圆柱和环形永磁体的磁力理论解析模型。第 3 节发展环形永磁体磁力测量方法,并搭建磁力测量平台,第四节基于电磁理论,建立有限元仿真模型,并对模拟参数进行优化。最后,分析两个永磁体磁力与间距变化规律,对整个研究工作和结果进行总结。

1 磁驱胶囊机器人驱动原理

磁驱胶囊机器人实验系统^[22]主要包括磁驱动模块、管内胶囊机器人模块和控制测量模块等。

1.1 磁驱胶囊机器人磁驱模块工作原理

磁驱模块是影响胶囊机器人运动状态和姿态位置的主要部件,如图 1 所示,该模块主要包括驱动永磁体,胶囊机器人,支撑平台,含液管道,三轴运动平台等,胶囊机器人在管内可作旋转或平移运动,管道可模拟生物肠道等管状软组织,外部驱动永磁体通过连接板固定在三轴运动平台上,可以改变任意空间位置,3 个方向移动的运动量程分别是 300,300,250 mm,精度 0.02 mm,且驱动永磁体还能绕竖直轴和自身中心轴旋转,转速可调。如图 1 所示,由于驱动永磁体和内置永磁体均为径向充磁,当驱动磁体靠近胶囊机器人时,对胶囊机器人产生径向磁力(X 方向),同时可以通过旋转驱动胶囊机器人产生

转动。含液管道采用 U 型玻璃管,里面充满不同粘度的二甲基硅油以模拟生物肠液,管的两端用软塞密封。胶囊机器人壳体是高分子材料,由 3D 打印成型,外表面光滑,包括两个端盖和一个光滑段,通过过盈配合连接。胶囊机器人中包含环形径向充磁永磁体,安放在壳体中心位置,并设计了卡扣将其固定。

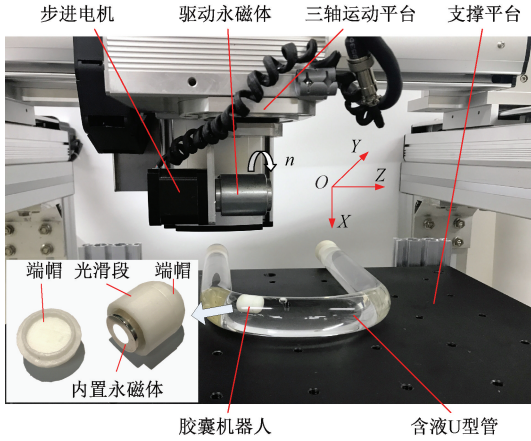


图 1 胶囊机器人磁驱动系统

Fig. 1 Magnetic drive system of the capsule robot

1.2 驱动磁场与胶囊机器人相互作用磁力建模

根据胶囊机器人驱动原理,驱动永磁体与胶囊机器人之间的作用力随着两者距离变化而改变,从而可提出驱动磁场与胶囊机器人相互作用磁力模型,如图 2 所示。外部驱动永磁体为永磁体 I,胶囊机器人内置永磁体为永磁体 II,两磁体平行放置,充磁方向一致且沿 X 轴磁化,磁极相对。永磁体 I 和永磁体 II 的内半径分别为 R_{1n} 和 R_{2n} ,外半径分别为 R_1 和 R_2 ,磁体高分别为 h_1 和 h_2 ,两磁体外侧和内侧的磁极面分别标号为 1~4,5~8,根据充磁方向可知,面 1、3、5、7 为 S 极,面 2、4、6、8 为 N 极,两永磁体中心距离为 ρ_m 。

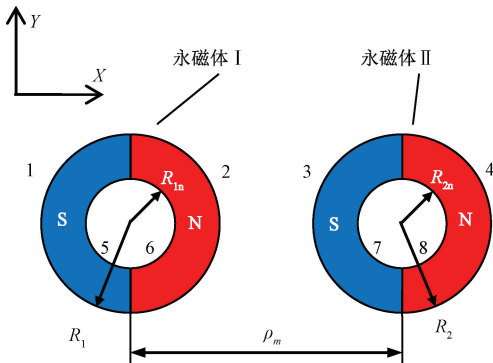


图 2 两个环形永磁体几何模型

Fig. 2 Geometric model of two ring permanent magnets

2 永磁体间磁力计算理论模型

推导径向充磁圆柱和环形永磁体在任意外磁场作用下的磁力解析模型,具有广泛工程应用价值和普适性指导意义。本节将采用等效磁荷模型,在不增加计算复杂度、不做任何假设及简化的情况下建立外部驱动永磁体与胶囊机器人内置永磁体间磁力的理论计算公式。

2.1 等效磁荷法理论基础

等效磁荷法是一种分析永磁体的有效方法,其中,磁体被简化为等效磁荷的分布。计算磁场时,将磁荷分布作为源项输入到静磁场方程中,并使用常规方法获得它的磁场,如式(1)所示,式中 $\mathbf{H}$ 是磁场强度, φ_m 是标量磁位。此外,等效磁荷模型也是永磁体在磁场中所受磁力的有效计算方法,该计算表达式如式(2)所示^[23]。

$$\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_m \mathbf{B}_{ext} dv + \int_S \sigma_m \mathbf{B}_{ext} ds \quad (2)$$

式中: ρ_m 为等效体磁荷密度,单位为 A/m^2 ; σ_m 为等效面磁荷密度,单位为 A/m 。根据本构方程 $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ 和式 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ 可以得到磁标量位的计算公式,从而可得到体磁荷密度和面磁荷密度分别为:

$$\rho_m = -\nabla \cdot \mathbf{M} \quad (3)$$

$$\sigma_m = \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为永磁体边界面的外法向单位矢量,该向量与 $\mathbf{M}$ 的夹角为 θ ,真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} Tm/A$ 。当永磁体为均匀磁化, $\mathbf{M}$ 为常矢量,此时等效体磁荷密度为 0。

研究表明,磁荷模型与电流模型在计算永磁体磁力时本质上是等价的^[24],然而,大多情况下对式(2)并不能获得理论解析结果,所以,在这种情况下,可以将永磁体的体积和表面离散化,代入外部磁感应强度 $\mathbf{B}_{ext}$,然后通过数值计算求出磁力,永磁体外部磁感应强度理论计算方法可参考文献[20]。结合上述分析,下面将从离散化的点磁荷入手,推导圆柱永磁体的磁力计算理论模型。

2.2 圆柱永磁体磁力计算理论模型

计算环形永磁体磁力前,先推导圆柱永磁体磁力计算表达式。圆柱永磁体 I 和永磁体 II 的形状特征、充磁方向和相对位置关系如图 3 所示,两永磁体充磁方向一致(X 方向),且均为径向充磁,磁体体积可根据实际需求而调整。图 3 中, O_1 和 O_2 分别位于两永磁体中心,两磁体的剩磁分别为 B_{r1} 和 B_{r2} ,磁体高分别为 h_1 和 h_2 ,磁极表面依次标号为 1,2,3,4。磁力计算的基本思路是先分别计算 X 方向面 1 与面 3、面 4 的作用力 F_{13}, F_{14} ,再计算面 2 与面 3、面 4 的作用力 F_{23}, F_{24} ,最后求合力 $\mathbf{F}_X$ 。下面以面 2 与面 3 的作用力为例,推导 X 方向磁力 F_{23X} 的数学表达式。

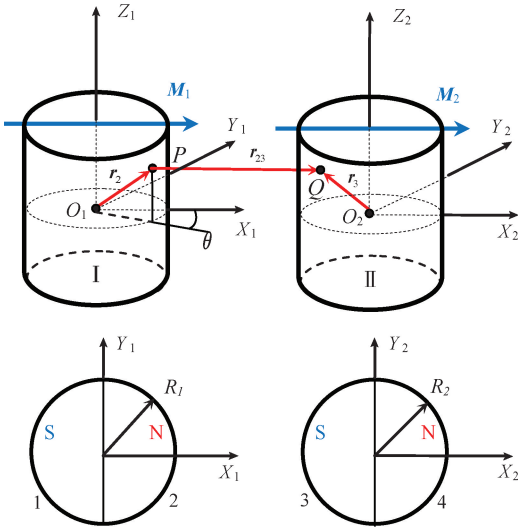


图3 两个圆柱永磁体几何模型

Fig. 3 Geometric model of two cylindrical permanent magnets

图3中, P 是永磁体 I 磁极表面2上的任意一点, 设 P 点向量为 $\mathbf{r}_2$, 则点 P 处微元面积可表示为 $dA_p = R_1 d\theta_2 dz_2$, 该微元面积上的磁荷为 $q_{m1} = dA_p \sigma_{m1}$; Q 是永磁体 II 磁极表面3上的任意一点, 设 Q 点向量为 $\mathbf{r}_3$, 则点 Q 处微元面积可表示为 $dA_Q = R_2 d\theta_3 dz_3$, 该微元面积上的磁荷为 $q_{m2} = dA_Q \sigma_{m2}$, 根据等效磁荷理论有 P, Q 两个磁荷之间的磁力为:

$$d\mathbf{F}_{23} = \frac{\sigma_{m1} \sigma_{m2}}{4\pi\mu_0} \frac{dA_p dA_Q}{|\mathbf{r}_{23}|^3} \mathbf{r}_{23} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{r}_{23}$ 为 P, Q 两点之间的向量 $\overrightarrow{PQ}$; σ_{m1} 和 σ_{m2} 分别为永磁体 I 和永磁体 II 的等效面磁荷密度。假设 $\overrightarrow{O_1 O_2} = \mathbf{m}$, 两永磁体没有 Z 方向和 Y 方向错动, 则向量 $\mathbf{m}, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ 在柱坐标下坐标为:

$$\begin{aligned} \mathbf{m} &= (\rho_m, 0, 0) \\ \mathbf{r}_2 &= (\rho_2, \theta_2, z_2) \\ \mathbf{r}_3 &= (\rho_3, \theta_3, z_3) \end{aligned}$$

根据矢量关系有 $\mathbf{r}_{23} = \overrightarrow{PQ} = \mathbf{m} + \mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2$, 通过坐标变换可得到:

$$\mathbf{r}_{23} = (\rho_m + R_2 \cos \theta_3 - R_1 \cos \theta_2) \mathbf{i} + (R_2 \sin \theta_3 - R_1 \sin \theta_2) \mathbf{j} + (z_3 - z_2) \mathbf{k} \quad (6)$$

从而有向量 $\mathbf{r}_{23}$ 的模为:

$$|\mathbf{r}_{23}| =$$

$$\sqrt{(\rho_m + R_2 \cos \theta_3 - R_1 \cos \theta_2)^2 + (R_2 \sin \theta_3 - R_1 \sin \theta_2)^2 + (z_3 - z_2)^2}$$

本文永磁体磁化被认为是恒定、刚性和均匀的, 所以有:

$$\sigma_m = \mathbf{M} \cdot \mathbf{n} = \mu_0^{-1} \mathbf{B}_r \cdot \mathbf{n} \quad (7)$$

故可以计算 X 方向的磁力微元为:

$$d\mathbf{F}_{23X} = d\mathbf{F}_{23} \cdot \mathbf{i} = k w d\theta_2 d\theta_3 dz_2 dz_3 \quad (8)$$

由于面2内点的角度坐标 $\theta_2 \in (-\pi/2, \pi/2)$, 面3内点的角度坐标 $\theta_3 \in (\pi/2, 3\pi/2)$, 由式(7)可知上下端面的面磁荷密度等于0, 因此可得到 X 方向面2和面3的相互作用力:

$$F_{23X} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \int_{-h_1/2}^{h_1/2} \int_{-h_2/2}^{h_2/2} k w d\theta_2 d\theta_3 dz_2 dz_3 \quad (9)$$

式中:

$$k = \frac{B_{r1} B_{r2} R_1 R_2}{4\pi\mu_0}, \quad w = \frac{\cos \theta_3 \cos \theta_2 (\rho_m + R_2 \cos \theta_3 - R_1 \cos \theta_2)}{|\mathbf{r}_{23}|^3}.$$

同理, 根据不同面上点的向量, 以及其角度积分范围不同, 可计算得到 $\mathbf{F}_{24X}, \mathbf{F}_{13X}, \mathbf{F}_{14X}$, 从而推导得到 X 方向两圆柱永磁体间的磁力为:

$$\mathbf{F}_X = \mathbf{F}_{24X} + \mathbf{F}_{23X} + \mathbf{F}_{14X} + \mathbf{F}_{13X} \quad (10)$$

此外, 磁极面2与面3在 Y 方向的作用力为 $d\mathbf{F}_{23Y} = d\mathbf{F}_{23} \cdot \mathbf{j}$, Z 方向的作用力为 $d\mathbf{F}_{23Z} = d\mathbf{F}_{23} \cdot \mathbf{k}$, 分别积分可得到 $\mathbf{F}_{23Y}$ 和 $\mathbf{F}_{23Z}$ 。所以, 根据不同面上点的向量, 以及其角度积分范围不同, 可计算得到 Y 方向和 Z 方向其他磁极面之间的作用力, 从而得到 $\mathbf{F}_Y$ 和 $\mathbf{F}_Z$ 。根据矢量计算, 永磁体间合力为 $\mathbf{F} = \sqrt{\mathbf{F}_X^2 + \mathbf{F}_Y^2 + \mathbf{F}_Z^2}$ 。

2.3 环形永磁体磁力计算理论模型

如图2所示, 环形永磁体相当于实心圆柱永磁体中间挖去一个同轴的圆柱体而得到, 根据2.2节推导的圆柱永磁体解析式和矢量叠加原理, 计算环形永磁体的磁力, 可以理解为实心圆柱永磁体的磁力减去由于中空部分而产生的磁力之差。

基于上述圆柱形永磁体磁力计算方法, 分别计算永磁体 I 外侧磁极面对永磁体 II 内、外磁极面的磁力, 永磁体 I 内侧磁极面对永磁体 II 内、外磁极面的磁力, 这部分磁力的矢量和即是由于中空部分而产生的磁力, 用符号 $\mathbf{F}_{XN}$ 表示。例如, 图2中 X 方向永磁体 I 的面5对永磁体 II 的面4作用力为:

$$F_{54X} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \int_{-h_1/2}^{h_1/2} \int_{-h_2/2}^{h_2/2} k w d\theta_1 d\theta_4 dz_1 dz_4 \quad (11)$$

式中:

$$k = \frac{B_{r1} B_{r2} R_{1n} R_2}{4\pi\mu_0}, \quad w = \frac{\cos \theta_3 \cos \theta_2 (\rho_m + R_2 \cos \theta_3 - R_{1n} \cos \theta_2)}{|\mathbf{r}_{54}|^3}$$

同理, 可以计算 $\mathbf{F}_{53X}, \mathbf{F}_{57X}, \mathbf{F}_{58X}$ 等。所以, X 方向环形永磁体间的磁力为:

$$\mathbf{F}_{Xring} = \mathbf{F}_X - \mathbf{F}_{XN} \quad (12)$$

2.4 环形永磁体磁力理论模型的数值计算

前面推导的磁力计算表达式是一个四重积分, 然而, MATLAB, Mathematica 等科学计算软件自带函数所能计算的积分重数普遍不高于三重, 本文基于自适应递归式快速计算方法^[25]、采用递归算法和自适应辛普森公式在

MATLAB 中开发多重积分函数。计算程序共编写了 3 个脚本,分别为主程序 mainP.m,多重积分函数 multiIntF.m 和被积函数定义文件 infun.m。

以磁力 F_{23X} 数值计算为例,主程序定义积分参数 θ 和 z 的积分范围,给定永磁体几何参数和磁性参数等可变参数的值,同时调用多重积分函数,格式如下所示。

$$F_{23X} = multiIntF([],[],A,@infun,P_1,P_2,\cdots) \quad (13)$$

式中:前两个参数用于程序运行时的数据传递,初始设定为空矩阵,infun 表示被积函数。 A 为积分参数矩阵,确定积分上下限和误差容限, P 为可变参数,如永磁体半径 R ,剩磁 B_r ,间距 ρ_m 等。多重积分函数 multiIntF 以 MATLAB 自带积分函数 quad 为基层算法求解核心,因此具有自适应性,通过多次调用达到求解任意重积分目的。多变量被积函数定义为式(14)中的 kw ,定义如下式。

$$\begin{aligned} function[y] &= infun(K,R_1,R_2,\rho_m,R_r,\cdots) \\ \theta_2 &= K(1,:), \theta_3 = K(2,:), z_2 = K(3,:), z_3 = K(4,:) \\ y &= kw \end{aligned} \quad (14)$$

到目前为止,式(9)结合上述数值方法可以计算出磁力。下节将给出两个环形永磁体相互作用时的计算结果,并通过有限元仿真和实验测量进行验证。永磁体的磁性参数和几何参数是计算分析磁力的基础,如表 1 所示。

表 1 环形永磁体参数

Table 1 Parameters of ring permanent magnets		
参数	永磁体 I	永磁体 II
外半径/m	0.012	0.012
内半径/m	0.006	0.006
长度/m	0.018	0.018
剩磁/T	1.21	1.21

3 环形永磁体的磁力测量

3.1 磁力测量方法与平台搭建

为了验证上述理论模型,本节开发专门的径向充磁环形永磁体磁力测量装置,其主要包括加载模块、信号测量和数据采集模块。测量方法与原理如框图 4 所示。

图 4 中,两永磁体平行布置,PM I 为驱动永磁体,PM II 为胶囊内置永磁体,可以更换不同尺寸的永磁体。两磁体间 X 方向磁力 F_x 和间距 ρ_m 分别通过拉力传感器和激光位移传感器测量,数据采集卡实时采集数据并保存到计算机。

基于上述磁力测量方法和原理,开发了环形永磁体的磁力测量装置,如图 5 所示。装置中步进电机系统包括控制器、驱动器、电机和驱动电源,电机额定电流 2.8 A,步距角 1.8°,力矩 1.26 N·m,可正反转。永磁

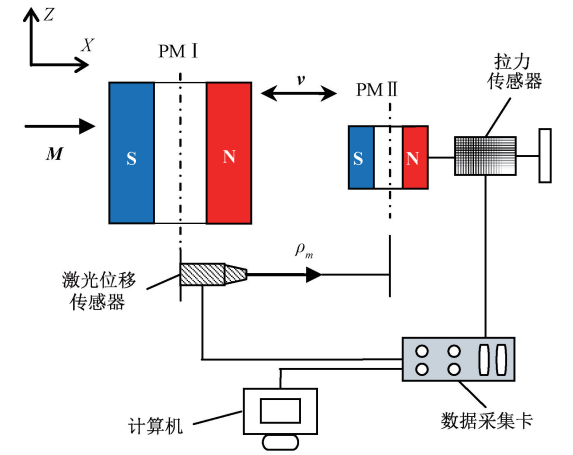


图 4 磁力测量系统工作原理

Fig. 4 Working principle of the magnetic measuring system

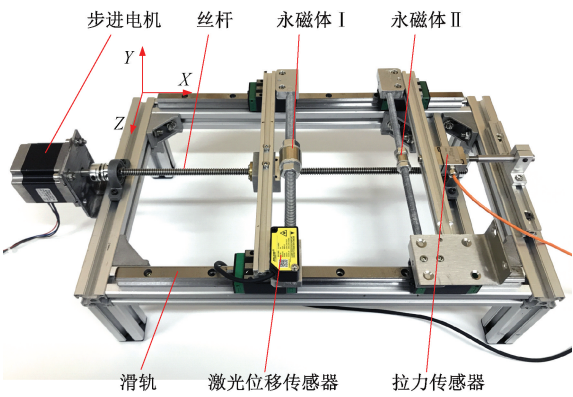


图 5 环形永磁体磁力测量装置

Fig. 5 Measuring device of magnetic force for ring permanent magnets

体 I 在丝杆驱动下可在 X 方向移动,电机每转一圈,丝杆带动永磁体 I 移动 2 mm。永磁体 II 与拉力传感器连接,激光位移传感器利用激光三角反射法实时测量两磁体间距,测量精度为 0.07 mm,测量范围 65~135 mm,输出 0~5 V 电压,电压与位移呈线性关系,利用挡板将位移控制在可测区间内,传感器与挡板的距离越近,输出电压越大。拉力传感器采用 S 型梁结构,量程是-300~300 N,灵敏度和线性度较高,稳定性好,输出-5~5 V 电压,电压与拉力呈线性关系。

当两磁体靠近时可以实现永磁体南北极自动对中,随后由螺母锁紧。实验装置保证滑轨的平行度并涂抹润滑油,尽量减小滑块与滑轨之间的摩擦力。

3.2 两永磁体间磁力测量实验

磁力测量实验在室温 25℃ 开展,测量装置上安装两个相同的环形永磁体,外直径、内直径和高分别是 24, 12, 18 mm,牌号为 N35,径向饱和充磁。实验前,完成各

传感器、电源、信号采集卡等连接后进行两永磁体磁极对中,将两永磁体靠近到外缘相距 2 mm 左右,松开螺母,让永磁体南北极自动对中,同时,通过螺母调整永磁体在 Z 方向的位置,确保两个永磁体与拉力传感器居中对齐。具体操作流程包括以下步骤:1) 连接数据线,设置参数。2) 安装永磁体,进行磁极和拉力方向对中。3) 启动步进电机系统,控制永磁体 I 靠近和远离永磁体 II,采集拉力和位数据。4) 数据处理与分析。需要指出的是,当两永磁体靠近,控制其停止位置,这里控制停止时最终间距 rr 为 3 mm。

4 理论、实验和有限元仿真结果的比较与参数分析

4.1 理论、实验和有限元仿真结果的对比研究

为了检验理论模型的准确性,本文基于 Maxwell 有限元分析软件建立了三维永磁体相互作用模型,已划分网格的两永磁体 3D 模型如图 6 所示。模型中网格划分为四面体单元,该单元的形状简单,对于复杂三维实体和曲面实体的网格划分稳定,容易获得更稳定更真实的结果。有限元仿真模型中永磁体的几何尺寸和磁性参数与实验一致,由于磁力是用有限元法中的虚功原理计算的,因此需要在模型周围建立一个合理空气区域。模型中外部空气区域大小取为 70 mm,设定永磁体网格 2 mm。此外,设置材料参数,矫顽力和剩磁分别为 963 kA/m 和 1.21 T,充磁方向均为 X 方向。

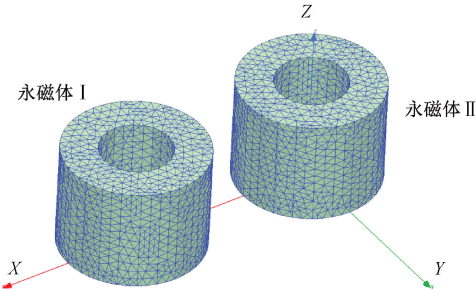


图6 3D 永磁体模型划分网格

Fig. 6 Meshed 3D model of permanent magnets

对于胶囊机器人磁驱系统,永磁体 I 相当于外部驱动永磁体,永磁体 II 相当于胶囊机器人内置永磁体,两者的布置和运动方向如图 4 所示,永磁体 I 向右运动靠近和远离永磁体 II,磁极相对。实验研究中,通过磁力测量装置如图 5 所示。测量不同间距下磁体间的磁力。两磁体几何参数和磁性参数如表 1 所示,将各参数代入上述磁力数学表达式和有限元仿真模型,得到磁力-间距关系曲线,如图 7 所示,永磁体间距离表示其外缘间距,用 rr 表示,当永磁体中心距 ρ_m 为 27 mm, rr 为 3 mm。从图 7

可以看出,理论模型计算、有限元仿真和实验测量得到永磁体间 X 方向磁力和间距之间的关系曲线吻合较好,磁力随着间距的变化呈非线性变化。两永磁体中心距 ρ_m 开始为 74 mm,永磁体外环间距 rr 为 50 mm,随着间距减小,磁力先缓慢增加,当距离减小到 20 mm 左右,磁力急剧增加,这表明永磁体间磁力随着间距增加衰减非常明显,这一变化特征可为胶囊机器人驱动模块设计和开发提供参考。此外,理论计算和实验测量结果同样验证了有限元仿真模型的建模方法和参数的正确性,该有限元仿真模型可以成为复杂磁体磁力计算分析的有效手段。

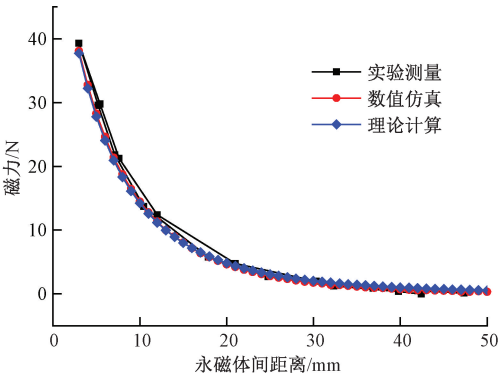


图7 两环形永磁体间磁力与间距的关系

$(R_1=R_2, R_{1n}=R_{2n}, h_1=h_2)$

Fig. 7 Relationship of magnetic force and spacing distance between two ring permanent magnets

$(R_1=R_2, R_{1n}=R_{2n}, h_1=h_2)$

如图 7 所示,当两永磁体间距离 rr 为 3 mm,实验测量的磁力与解析计算结果误差小于 4%,与有限元仿真结果误差小于 3%,这些误差可能来源于实验装置和磁性参数误差等,同时也说明理论计算模型和有限元仿真模型科学可靠,磁力测量方法可行且实验装置测得结果准确稳定。下面将通过理论模型分析永磁体 II 的参数变化对磁力的影响规律。

4.2 参数分析

为了在实际应用中设计和优化胶囊机器人磁驱系统,减小胶囊机器人体积,提高其驱动性能和胃肠道诊疗效果,则有必要了解胶囊机器人内置永磁体尺寸参数对磁力的影响。因此,本小节采用磁力计算理论模型分析胶囊机器人内永磁体 PM II 长度 h_2 和内半径 R_{2n} 以及体积对磁力的影响规律。分析中,两永磁体平行放置,驱动永磁体 PM I 的磁性参数和几何参数保持不变,剩磁 B_r 为 1.21 T,外半径、内半径和长度分别为 12,6 和 18 mm。

胶囊机器人驱动系统中,一般胶囊机器人的体积较小,且明显小于驱动磁体。当改变 PM II 的长度,两永磁体 X 方向磁力与 h_2 变化关系曲线如图 8 所示。计算中,

PM II 外半径和内半径分别为 12 和 6 mm,两永磁体外缘间隔 rr 为 3 mm,磁体长度由 5 mm 变为 16 mm,计算得到的磁力从 12.17 N 变为 35.17 N,且呈线性关系。结果表明,胶囊机器人的驱动力随着自身磁体长度的增加而非线性增加。

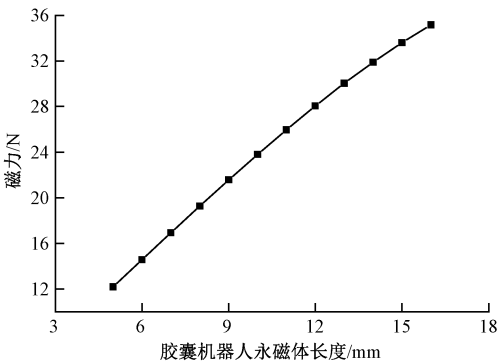


图 8 不同长度胶囊机器人内置永磁体的磁力($rr=3$ mm)
Fig. 8 The magnetic force of the permanent magnet inside the capsule robot of different length ($rr=3$ mm)

当保持胶囊内 PM II 的外半径和长度不变,改变内半径 R_{2n} ,计算两永磁体 X 方向磁力与 R_{2n} 变化关系曲线如图 9 所示。计算中,PM II 外半径和长度分别为 12 和 18 mm,两永磁体外缘间隔 3 mm,磁体内半径由 1 mm 变为 11 mm,计算 X 方向磁力从 47.75 N 变为 9.4 N,且呈非线性关系,随着内半径减小,永磁体厚度增加,磁力增大趋势变缓。结果表明,保持永磁体外缘间距和中心距不变,胶囊机器人的驱动力随着自身磁体厚度的增加而非线性增加。

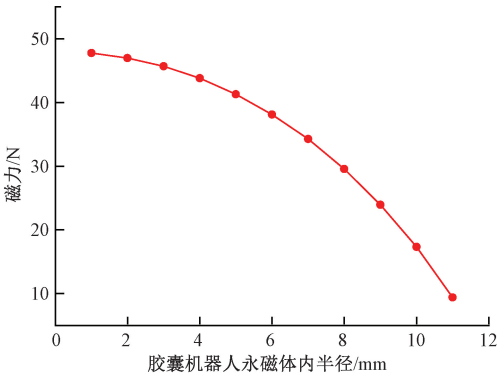


图 9 不同内半径胶囊机器人内置永磁体的磁力($rr=3$ mm)
Fig. 9 The magnetic force of the permanent magnet inside the capsule robot with different inner ring radius ($rr=3$ mm)

为了更好地理解胶囊机器人驱动机理,优化其内部结构,图 10 展示了同一驱动磁体对不同尺寸胶囊机器人的磁力特性和驱动效果,两磁体位置关系如图 4 所示。

胶囊机器人尺寸变化如表 2 所示,Size1 ~ Size4 表示外半径、内半径和长度分别是原尺寸的 5/6、4/6、3/6、2/6,当两磁体外缘间距 rr 从 0 增大到 50 mm,磁力随着间距增加呈非线性减小。从图 10 可以看出,当外缘间距为 1 mm,随着体积减小,磁力减小,当从 Size1 变为 Size2,体积减小 16.7%,磁力从 28.17 N 变为 13.19 N,减小 53.2%。

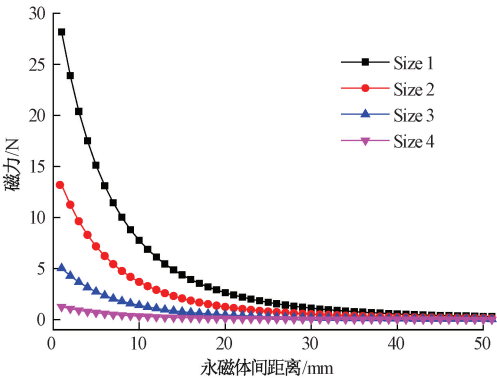


图 10 不同尺寸胶囊机器人内置永磁体的磁力
Fig. 10 The magnetic force of the permanent magnet inside the capsule robot of different sizes

表 2 胶囊机器人永磁体 II 几何参数
Table 2 Geometric parameters of capsule robot permanent magnet II

改变永 磁体 II	永磁体 I	永磁体 II			与原尺寸 比例关系
		R_2	R_{2n}	h_2	
Size 1	$R_1=0.012$ $R_{1n}=0.006$ $h_1=0.018$	0.010	0.005	0.015	5/6
Size 2		0.008	0.004	0.012	4/6
Size 3		0.006	0.003	0.009	3/6
Size 4		0.004	0.002	0.006	2/6

5 结 论

本文针对胶囊机器人磁驱模块中的重要问题开展了理论建模、实验测量和有限元仿真,理论解析计算、实验测量与有限元模拟仿真结果吻合较好。主要结论如下:

- 1) 根据胶囊机器人驱动机理,开展了驱动磁体与胶囊磁体的磁力建模;基于等效磁荷法建立了径向充磁圆柱和环形永磁体的磁力计算理论模型,并采用自适应递归式快速计算方法对磁力四重积分解析表达式开展了数值计算。
- 2) 发展了环形磁体间磁力测量方法,并开发了多通道磁力实时测量装置,同步测量两环形永磁体间的 X 方

向磁力与间距的变化关系,具有高精度、自动化等特点。同时,基于麦克斯韦方程组,在 Maxwell 软件中建立和优化了有限元仿真模型。

3) 通过理论、实验和有限元模拟分析,得到了磁力随间距改变而导致的非线性衰减规律,随着距离增大,永磁体磁力开始急剧衰减,然后再缓慢减小到 0。利用计算模型开展了参数分析,揭示了胶囊机器人内置环形磁体长度、厚度以及体积对磁力的影响规律。

4) 本文建立的磁力计算理论模型可以用于快速计算径向充磁环形永磁体间的磁力特性,具有高效率、高精度等优点;有限元仿真模型可用于分析复杂永磁体系空间磁场分布特征和相互作用。研究结果将为胶囊机器人磁驱系统的研发提供参考,为磁驱胶囊机器人在胃肠道内的精准控制提供理论基础。

参考文献

- [1] IDAN, G, MERON G, GLUKHOVSKY A, et al. Wireless capsule endoscopy [J]. Nature, 2000, 405(6785): 417.
- [2] MAPARA S S, PATRAVALE V B. Medical capsule robots: A renaissance for diagnostics, drug delivery and surgical treatment [J]. Journal of Controlled Release, 2017, 261: 337-351.
- [3] 颜国正, 邝帅, 汪炜. 胃肠道疾病无创诊查技术进展[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(10): 1404-1409.
YAN G ZH, KUANG SH, WANG W. Progress in noninvasive diagnosis of gastrointestinal diseases [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(10): 1403-1409.
- [4] GAO M Y, HU CH ZH, CHEN ZH ZH, et al. Design and fabrication of a magnetic propulsion system for self-propelled capsule endoscope [J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2010, 57(12): 2891-2902.
- [5] KIM B, LEE M G, LEE Y P, et al. An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 125(2): 429-437.
- [6] SWAIN P, TOOR A, VOLKE F, et al. Remote magnetic manipulation of a wireless capsule endoscope in the esophagus and stomach of humans (with videos) [J]. Gastrointestinal Endoscopy, 2010, 71(7): 1290-1293.
- [7] 简小云, 梅涛, 汪小华. 胶囊内窥镜机器人的外磁场驱动方法[J]. 机器人, 2005(4): 367-372.
JIAN X Y, MEI T, WANG X H. External magnetic field drive method of capsule endoscopic robot [J]. Robot, 2005(4): 367-372.
- [8] 邝帅, 颜国正, 王志武, 等. 无线胶囊内窥镜新型接收线圈结构设计与分析方[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 55-63.
KUANG SH, YAN G ZH, WANG ZH W, et al. Design of novel structure and analysis method for receiving coil of wireless capsule endoscopy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 55-63.
- [9] 姜萍萍, 付文浩, 王志武, 等. 用于胃肠道微型机器人的组合螺线管式无线能量发射系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 114-122.
JIANG P P, FU W H, WANG ZH W, et al. Research on combined solenoid wireless power transmitting system for gastrointestinal micro-robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 114-122.
- [10] DI N C, BECCANI M, SIMAAN N, et al. Jacobian-based iterative method for magnetic localization in robotic capsule endoscopy [J]. IEEE Transactions on Robotics: A Publication of the IEEE Robotics and Automation Society, 2016, 32(2): 327-338.
- [11] SHETYE S B, AGASHE J S, ARNOLD D P. Investigation of microscale magnetic forces for magnet array self-assembly [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2007, 43(6): 2713-2715.
- [12] KIM S H, SHIN K S, HASHI S, et al. A pushing force mechanism of magnetic spiral-type machine for wireless medical-robots in therapy and diagnosis [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2013, 49(7): 3488-3491.
- [13] JANSEN J W, VAN LIEROP C M M, LOMONOVA E A, et al. Ironless magnetically levitated planar actuator [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(7): 554-556.
- [14] AKOUN G, YONNET J P. 3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1984, 20(5): 1962-1964.
- [15] 修世超, 谭庆昌, 孟慧琴. 同轴环形磁铁磁作用力计算的等效磁荷法[J]. 沈阳黄金学院学报, 1995(3): 359-363.
XIU SH CH, TAN Q CH, MENG H Q. Equivalent magnetic charge method for calculating the magnetic force of coaxial ring magnet [J]. Journal of Shenyang Institute of Gold Technology, 1995(3): 359-363.
- [16] ALLAG H, YONNET J P, FASSET M. 3D analytical calculation of interactions between perpendicularly magnetized magnets—application to any magnetization direction [J]. Sensor Letters, 2009, 7(3): 486-491.
- [17] LI J, BARJUEI E S, CIUTI G, et al. Magnetically-driven medical robots: An analytical magnetic model for endoscopic capsules design [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 452: 278-287.

- [18] QU C, PEI Y CH, LI ZH X. A study on magnetic force characteristics between two cuboidal permanent magnets[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2021, 34(9): 2441-2454.
- [19] YE B, ZHANG W, SUN Z J, et al. Study on a magnetic spiral-type wireless capsule endoscope controlled by rotational external permanent magnet [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015, 395: 316-323.
- [20] 郭志明, 梁亮, 彭正乔, 等. 胶囊机器人驱动磁场的建模与测量[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 216-223.
- GUO ZH M, LIANG L, PENG ZH Q, et al. Modeling and measurement of magnetic field driven by capsule robot [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 216-223.
- [21] GONZALEZ M I. Forces between permanent magnets: Experiments and model [J]. European Journal of Physics, 2016, 38(2): 025202.
- [22] TANG P H, LIANG L, GUO ZH M, et al. Orthogonal optimal design of multiple parameters of a magnetically controlled capsule robot [J]. Micromachines, 2021, 12(7): 802.
- [23] FURLANI E P. Permanent magnet and electromechanical devices: Materials, analysis, and applications [M]. Academic Press, 2001: 97-205.
- [24] ZHANG Y Y, LENG Y G, ZHANG H, et al. Comparative study on equivalent models calculating magnetic force between permanent magnets [J]. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment, 2020, 1(1): 43-65.
- [25] 裴永臣, 关景晗, 王佳炜. 一种任意重积分自适应递归式快速计算方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2595-2601.
- PEI Y CH, GUAN J H, WANG J W. An adaptive recursive fast method for arbitrary multiple integral[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2595-2601.

作者简介



郭志明, 2010 年于厦门理工学院获得学士学位, 2018 年于天津大学获得硕士和博士学位, 澳洲昆士兰大学联合培养博士。长沙学院讲师, 研究方向为实验固体力学, 测量技术, 软体机器人。

E-mail: zmguo@ccsu.edu.cn

Guo Zhiming received his B. Sc. degree from Xiamen University of Technology in 2010, and received his M. Sc. and Ph. D. degree both from Tianjin University in 2018. He was a joint Ph. D. student at the University of Queensland in Australia. He is currently a lecturer at Changsha University. His main research interests include experimental solid mechanics, measuring technology and soft robot.



梁亮(通信作者), 2000 年于洛阳工学院获得学士学位, 2003 年于浙江大学获得硕士学位, 2012 年于中南大学获得博士学位。长沙学院教授。主要研究方向为医疗微型机器人与智能控制。

E-mail: liang@ccsu.edu.cn

Liang Liang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Luoyang Institute of Technology in 2000, received his M. Sc. degree from Zhejiang University in 2003, and received his Ph. D. degree from Central South University in 2012. He is currently a professor at Changsha University. His main research interests include medical micro-robot and intelligent control.