Journal of Southwest University (Natural Science Edition)

DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2015. 09. 025

# 主动型无线胶囊内窥镜闭环驱动系统设计®

杨 奕1, 窦庭杰1, 杨 川2, 王正旭1, 周川云1

1. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054; 2. 重庆机电职业技术学院 自动化工程系, 重庆 402760

摘要:为实现无线胶囊内窥镜的主动控制,通过驱动系统(机电能量转换)原理的分析,提出了闭环控制系统的设 计方案,推导出驱动力的关系式.并采用二维磁场有限元法的数学离散模型,给出了驱动技术的控制算法,通过 Ansys模型仿真验证了驱动力和控制算法的正确性.

关键 词:胶囊内窥镜;主动控制;驱动技术;有限元法;Ansys模型

中图分类号: TN919; R444 文献标志码: A 文章编号: 1673-9868(2015)09-0165-06

肠道疾病不仅是高发疾病,并且在医学上也存在许多难题.肠胃道内太多的不确定因素,使得对肠胃 疾病的诊断有很大的难度,所以一种能够安全、精确、彻底、无痛的肠道检测技术为医学界的迫切要 求<sup>[1-2]</sup>.当前医学上无线胶囊内窥镜在国内外已有初步的应用,但是现有的胶囊内窥镜在体内的运动是靠 胃肠道的蠕动来实现的,不能受医生控制.本研究旨在利用相关技术来解决这个问题,使无线胶囊能在医 生的控制下运动.要实现胶囊内窥镜的主动驱动,一个首要的条件是系统或者医生要了解胶囊在人体内精 确的空间位置,国内外一些单位、机构已经完成了对定位定向系统的研究,得到的6维精确定位定向数据 为本研究的主动驱动闭环控制的实现提供了基础<sup>[3]</sup>.

#### 1 系统整体结构与控制系统设计

选择一种目前比较成熟的定位定向系统算法得到胶囊的 6 维位置和方向信息,以此作为反馈系统.以 外磁场驱动技术驱动胶囊旋转,结合磁场螺旋主动驱动技术(主要是算法)控制方向(图 1).两种技术组成 胶囊的闭环驱动系统,控制胶囊前进、后退及停留在某个位置,还可以控制胶囊摄像头对准方向.研究的重 点是外磁场驱动技术(机电能量转换)、胶囊的闭环主动驱动控制算法.在本文的研究过程中,采用模拟方 式,从理论上研究将外磁场主动驱动技术应用于无线胶囊内窥镜,并建立仿真模型验证其可行性.

分析胶囊的机电能量转换原理得出驱动方法.利用 Ansys 软件仿真,通过建立数学模型,改进相关技术、选择最优算法,计算出空间任意点上磁场强度、方向与激励线圈的电流大小关系,线圈间磁场的分布及均匀度.在软件上模拟以线圈构成的一个三维可调驱动模型,利用 CPU 处理器 STM32F103 以及外围电路组成控制电路,用主动驱动算法计算出放置在体外的两对垂直线圈中每对线圈上的电流的大小和极性,使线圈产生一个最佳的、与磁铁和胶囊主轴基本垂直的匀强磁场.在这磁场作用下,使人体内胶囊中的磁

① 收稿日期: 2014-07-05

基金项目:重庆市科委自然科学基金项目(cstc2012jjA40066);重庆市教委科学技术研究项目(KJ130807);重庆市高等学校大学生创新 创业训练计划项目(201411660010);重庆理工大学拔尖创新人才培养资助项目(BC201303).

作者简介:杨 奕(1970-),男,重庆人,硕士,教授,主要从事电工电子技术、信息理论及汽车电子方面的研究和教学工作的研究.

产生的磁场中运动

胶囊基本控制原理框架图

6维信息跟踪定位系统

图 1

反馈信号

控制信号

CPU

STM32 控制系统

铁绕其主轴产生旋转,在螺纹的带动下胶囊旋转前进、后退、和滞留<sup>[4-5]</sup>.

### 2 无线能量传输系统研究

胶囊的供电系统和驱动系统可以理解为一 个实现能量转换的电磁装置(电能转换为机械 能).如图2所示,无线能量传输系统能够实现 这一功能,主要是采用外部几个大型线圈和永 磁体来定型和导向磁场.其中,能量传递和转 换的媒介是磁场,图2中变量的含义为国际统 一标号含义.



场模刑

图 2 驱动系统的机电能量转换

根据洛伦兹电磁力定律:

$$\boldsymbol{F} = q\left(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}\right) \tag{1}$$

永磁体相当于线圈的转子部件,与转子部件相联系的是一个转子磁场(由永磁体产生),同样定子部件(驱动线圈)对应于一个定子磁场(驱动线圈的电流激励).分别用一组 N 极和 S 极来表示定转子各自的 磁场.就像罗盘磁针总是力图与地磁场的方向一致一样,定转子磁极也总是趋向于对齐,转矩大小和定转子磁极轴线与对齐位置之间的偏移量有关.因此,定子磁场的旋转超前与转子磁场,定子牵引转子运动并对其做功<sup>[6]</sup>.

图 2 中,基于磁场的机电能量转换装置被表示成一个无损耗的二端口磁场储能系统,电端有两个端口 变量,即电压 *e* 和电流 *i*,机械端也有两个端口变量,即转矩 *T*<sub>1/d</sub>和位移 θ.

$$\mathrm{d}W_{fld}/\mathrm{d}t = e \cdot i - T_{fld}\,\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}t \tag{2}$$

(2)式中,无损线圈的端电压等于线圈磁链对时间的导数,即

$$e = \frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t} \tag{3}$$

将(3)式代入(2)式,并对(2)式两端同乘以 dt,可得:

$$dW_{fld}(\lambda, \theta) = i d\lambda - T_{fld} d\theta$$
(4)

当磁链  $\lambda$  保持为常数时,磁场储能  $W_{fld}$  对位移  $\theta$  的偏导数

$$\partial W_{fld}(\lambda, \theta) / \partial t = -T_{fld}$$
<sup>(5)</sup>

对于线性磁系统,磁链 $\lambda = L(\theta) \cdot i$ ,故得

$$T_{fld} = \frac{i^2}{2} \frac{\mathrm{d}L\left(\theta\right)}{\mathrm{d}\theta} \tag{6}$$

由此可求得力的值, 它是磁链 λ 和机械端位移 x 的简单函数, 是"以储能系统本身无损"为前提的<sup>[7]</sup>.

当线圈组产生旋转磁场时,在永磁铁上产生转矩 T,带动胶囊微机器人以U的角速度做旋转运动.

### 3 二维磁场有限元法的数学离散模型

得出了胶囊内窥镜机电能量转换方法之后,为了实现胶囊内窥镜有效运动和精确调节,还必须得出胶囊的主动驱动原理、控制算法.对构建的磁场模型,采用有限元法的数学离散模型进行分析<sup>[8]</sup>.

系统研究空间二维磁场,需要有限元离散化平面四边形单元,这样可以将电磁场系数和激励矩阵化, 同时利用 matlab 在设计的二维磁场边界限定条件下求解出静态二维电场的电势和磁场的磁势值.有了电磁 势值,再通过与电场强度和磁场强度的关系计算,则可以得到场强的大小.在研究电磁场中的力和力矩过 程中,场的贮能则是一个不能回避的重要参数.

设 $\varphi$ 为电位函数,则:

$$-\frac{\partial\varphi}{\partial x} = E_x, -\frac{\partial\varphi}{\partial y} = E_y \tag{7}$$

对于二维空间中把整个空间可以将体积分成 m 个单元(离散单元),每一个单元实际上就是一个面元.其中,每一个单元由3个节点组成,把场域按三角形分割,在坐标系中用一阶有限元法表示出各三角形单元内的电位:

$$\varphi = a_1 + a_2 x + a_3 y \tag{8}$$

假设把当面元取足够小,则可以认为单元的电场是固定的[9-10].

进行矩阵运算得对应 e 单元的电位函数  $\varphi$ :

 $\varphi^{e} = \varphi_{i}\psi^{e}_{i} + \varphi_{j}\psi^{e}_{j} + \varphi_{k}\psi^{e}_{k}$ (9)  $\varphi_{i}\psi^{e}_{i}, \varphi_{j}\psi^{e}_{i}, \varphi_{k}\psi^{e}_{k} \neq e \ \mathsf{E} \ \mathsf{E$ 

 $\phi_i \phi_i, \phi_j \phi_j, \phi_i \phi_i$  定 它 医战争元节点的 圣国级,将兵农区方 法应用于整个区域 $\Omega$ ,则可以用线性插值的方法即基函数和 节点电位推导出区域内任何单元的达朗贝尔方程,从而推 算得到在区域 $\Omega$  中的电位分布函数,即:

$$\varphi \approx \bar{\varphi} = \sum_{e=1}^{N} \varphi^{e} = \sum_{e=1}^{N} \left[ \varphi_{i} \psi_{i}^{e} + \varphi_{j} \psi_{j}^{e} + \varphi_{k} \psi_{k}^{e} \right] \quad (10)$$

然后通过变分法推导出二维电磁场使用有限元方法得到的 数学离散模型<sup>[11-13]</sup>.二维电磁场的泛函表达式为:



图 3 求解场域的三角形网络结构图

$$F = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon \mid \nabla \varphi \mid^{2} \mathrm{d}\Omega - \int_{\Omega} q\varphi \mathrm{d}\Omega$$
(11)

把(11)式处理为泊松方程的泛函数:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon \int_{\Omega} \left[ \sum_{e=1}^{N} \left( \varphi_{i} \nabla \psi_{i}^{e} + \varphi_{j} \nabla \psi_{j}^{e} + \varphi_{k} \nabla \psi_{k}^{e} \right) \right]^{2} d\Omega - \int_{\Omega} q \sum_{e=1}^{N} \left[ \varphi_{i} \psi_{i}^{e} + \varphi_{j} \psi_{j}^{e} + \varphi_{k} \psi_{k}^{e} \right] d\Omega$$
(12)

为了求解未知变量  $\varphi_i$ ,  $\varphi_j$ ,  $\varphi_k$ , 在计算过程中泛函 *F* 一定要使用极小值, 于是, 对各个节点电位的导数可以通过泛函 *F* 来求解, 同时令其等于零, 最终可以求解出  $\varphi_i$ ,  $\varphi_j$ ,  $\varphi_k$  等变量所满足的线性关系. 其中对于求解激励矩阵和系数矩阵中的每个元素均需要对每个单元逐一进行求解, 矩阵中的各元素均是通过各单元对其的贡献累加得到的, 其可以表示为

$$\begin{bmatrix} f^e \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f^e_i \\ f^e_j \\ f^e_j \\ f^e_k \end{pmatrix}$$
(13)

对于每个元素对应的行均可以通过三角形顶点所对应的区域次序来确定,通过

$$f_{i}^{e} = \int_{\Omega} \varepsilon \psi_{i}^{e} d\Omega = \int_{\Omega} q \left( a_{i}^{e} + \beta_{i}^{e} x + \gamma_{i}^{e} y \right) dx dy$$
(14)

可以求解得到局部激励矩阵和系数矩阵的各个元素.那么整体矩阵则可以利用求解出局部系数矩阵和局部 激励矩阵的各元素得到,对应的行列标号取决于对应节点所在区域的序号,从而可以得到在磁场区域内所 对应各点的电位值<sup>[14]</sup>.

# 4 Ansys 中模型的构建

在系统中建立通电线圈的磁场模型,二维磁场. 就二维的通电线圈电磁场分析在 Ansys 中可以使用 Maxwell 方程组作为初始点. 使用有限元法得到的自由度一般是磁位或磁通量,如矢量磁位、边界磁通等 可以通过 Ansys 计算得到. 磁通衰减、磁场耦合区域均可由这些自由度导出<sup>[15-16]</sup>.

永磁体在四组线圈构成的空间磁场实质为二位空间上的磁场耦合和受力分析.采用 Ansys 的 2-D 静态 磁场分析.在 2-D 实体单元中,投影到空间中的 X,Y 方向,磁场分布为四边形(4 节点),其中自由度最多 可达到每个节点4个,可以是磁矢势、电流、电磁通和电动势降,由于 2-D 单元为二维的,运用矢量位法,则每个节点上仅仅有一个矢量自由度:AX(X 方向上的磁矢量位).其中另一个附加的自由度为电流 (CURR),是载流线圈中每匝中的电流值,便于给源线圈施加变化的电流,用于分析载流线圈磁场与永磁 体磁场的耦合条件.当电流载荷是通过一个外部电路施加时,往往需要 AX,CURR 和 EMF(电动势降)这 几个自由度.

以 Ansys 图像用户界面的方式做出通电载流线圈与运动体的二维空间有限元分析(图 4),图 4 中 A, B,C,D 均为通电线圈,4 个线圈中间为模拟的胶囊磁体,改变的是通电线圈大小及极性.



图 4 Ansys 模型

用相应的 Ansys 命令格式导入 2-D 单元的各个自由度. 磁场中永磁体的运动控制分析可以近似看作为 一种均匀运动体,意思是"材料"在空间运动中不发生改变. 运动体在静态和瞬态电磁分析中可以引入磁雷 诺数(Rrynolds Number)M<sub>re</sub>=μνd/ρ,来表示电磁场中运动体分析精度和系统精细水平、磁导率(μ)、电导 率(ρ)、状态变化速度(ν)以及运动体有限元单元的特征长度(d)之间的关系,但不能适用于谐波磁场即低 频交流电所产生的磁场中分析中.

# 5 Ansys 仿真测试

依据 ANSYS 对 2-D 静态磁场的分析,在 ANSYS 构建的物理环境中,运用维磁场有限元法的数学离 散模型加入电流,磁矢量等自由度,联立 Maxwell 方程组导出磁通衰减、磁场耦合区域.则可以得到如下 图 5 所示的永磁体在磁场中的磁势和磁场耦合情况受力仿真图,图 5 中颜色的变化代表磁场强度和受力大 小的变化.从图 5 中可以看出,仿真结果与理论基本一致,当依次改变线圈组轴向驱动通电电流大小和极 性可以实现旋转运动.若胶囊表面采用螺纹状,当改变受力时,螺旋线会对力进行分解,则可以实现胶囊的 旋进.即通过控制通电线圈电流的大小和极性从而可以实现胶囊运动速度和方向的可控.





图 5 永磁体与磁场耦合的 Ansys 仿真结果

## 6 结束语

本研究利用主动型闭环驱动,探索了永磁体在空间电磁场中的磁场耦合和受力分析,借助有限元 分析软件 Ansys,对空间中二维磁场进行 2-D 静态磁场分析,采用三角形网格自动剖分法对二维磁场 进行有限元法的数学分离,凭借有限元法的理论和磁场区域内各节点的矩阵推论演算,解析出各节点 的电位,从而建立起二维磁场离散的数学模型. Ansys 加入模型,更加完整的的复现出永磁体与磁场 的关系.

#### 参考文献:

- [1] 赵德春,郭毅军,彭承琳.胶囊内窥镜中主动式运动机构综述 [J]. 生物医学工程学杂志, 2010, 27(1): 215-218.
- [2] 张永顺,岳 明,郭东明,等. 肠道内变径胶囊微机器人空间磁力矩特性 [J]. 中国科学(E辑:技术科学),2009, 39(7):1284-1290.
- [3] 唐永川,刘 枫,祁 虔,等.平面倒立摆系统的自校正仿人协调控制 [J].西南大学学报:自然科学版,2013(10): 94-104.
- [4] 朱胜清. 胶囊内窥镜机器人微驱动及控制的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [5] ZHANG Yong-shun, WANG Na, DU Chun-yu, 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] HU Chao, CHEN Dong-mei, MENG Qing-hu, et al. Control Strategy of Active Actuation System of Wireless Capsule Endoscope [C] //Proceeding of the 2007 IEEE International Conference on Intergration Technology. Shenzhen: IEEE, 2007: 1-6.
- [7] 王玉巧, 蔡晓艳. 基于单片机的流量控制 [J]. 科技信息, 2010(9): 480-492.
- [8] 胡伟平,邓辉文.个性化人脸图像模拟研究 [J].西南大学学报:自然科学版,2014,36(4):178-184.
- [9] 李小亮,丁晓明,尹 然,等. 基于 RDF 图的测试用例生成 [J]. 西南大学学报:自然科学版, 2014, 36(1): 146-151.
- [10] 刘广伟,毛陆虹,门春雷.一种有源血氧传感标签设计 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(3): 113-116.
- [11] 管凤旭,姜智超,吴秋雨,等.指静脉与折痕双模态图像采集系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32(2): 124-127.
- [12] 操良平,董晓云,王 风,等. 基于光反馈多模半导体激光器的多信道单向混沌同步与通信[J]. 西南大学学报:自然科 学版, 2014, 36(3): 152-159.

[13] 王晓民,李远洋,王新沛,等.消化道内窥镜的发展及趋势[J]. 医疗卫生装备,2013,34(1):88-90.

- [14] 文开庭. FC -空间中的匹配定理及其对一般拟平衡问题系统的应用 [J]. 西南大学学报:自然科学版, 2013, 35(10): 79-82.
- [15] NAKAMURA T, TERAN A. Capsule Endoscopy: Past, Present and Future [J]. Journal of Gastroenterology, 2008, 43(2): 93-99.
- [16] 李雅芝, 窦家维. 一类 3 种群系统的动力学行为及优化问题研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2014, 36(7): 73-78.

# Design of a Closed-Loop Drive System for the Active Wireless Capsule Endoscope

YANG Yi<sup>1</sup>, DOU Ting-jie<sup>1</sup>, YANG Chuan<sup>2</sup>, WANG Zheng-xu<sup>1</sup>, ZHOU Chuan-yun<sup>1</sup>

1. College of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Department of Automation Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 402760, China

**Abstract**: In order to achieve the active control of wireless capsule endoscopes, this paper puts forward a design scheme of the closed-loop control system through an analysis of the principle of the drive system (electromechanical energy conversion), and deduces the relations of the driving force. A mathematical discrete model of the 2-D finite element method (FEM) is used to give the control algorithm of driving technology. Finally, an Ansys model simulation verifies the correctness of the drive and control algorithm. **Key words**: capsule endoscopy; active control; drive technology; finite element method; Ansys Model

责任编辑 潘春燕