

# 基于磁流变液的医疗胶囊机器人运动仿真分析

王百一 杨程理 田雨 汪铁宁 刘新华  
(中国矿业大学 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了实现胃肠道疾病的无创诊疗, 本文提出了一种基于磁流变液的软体医疗胶囊机器人。此机器人采用磁流变液和水凝胶相结合的混合材料, 减少了设备对胃肠道的侵害。使用永磁体和磁流变液相结合的磁控系统, 实现对医疗胶囊机器人的精准控制。同时, 本文利用 MATLAB 进行建模仿真, 对磁流变医疗胶囊机器人的平移运动和斜面运动进行理论分析, 从而分析各个外界因素对该机器人运动的影响关系。

**关键词:** 软体医疗胶囊机器人; MATLAB; 运动特性

## 0 引言

目前, 胃镜检查在医疗行业拥有较大的市场, 小型医疗胶囊机器人是用于人体胃肠道疾病检查的新兴手段。采用磁流变液和水凝胶薄膜材料设计的软质壳体, 对胃肠道组织伤害较小。同时, 利用永磁体和磁流变液组成的磁控系统进行组合驱动, 增加了胶囊机器人的运动能力, 缩小了胶囊机器人的体积。因此, 磁流变液软体医疗胶囊机器人的研究对实现无创诊疗具有重要意义, 是未来医疗领域不断探索的重点方向。

## 1 结构方案

基于磁流变液的软体医疗胶囊机器人的结构如图 1 所示。主体部分由外壳和柔性控制结构、通信模块、震荡模块三部分组成。

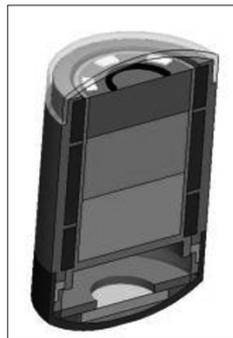


图 1 胶囊机器人结构

外壳部分是磁流变液和水凝胶按比例结合的混合材料, 可以有效地减少对胃肠道表面的侵害; 在磁驱动方面, 柔性控制结构由永磁环和铁磁流体组合而成, 使壳体材料部分实现流体-半固体-固体间的毫秒级控制转换, 实现柔性磁控; 通过磁流变液与水凝胶材料结合使用, 建立软体表面翻转模型。

通信模块包含摄影机、电池、无线发射机, 实现了对胃肠道内部情况的实时交互。通过外部显示设备可以实时的了解到肠道内的状况, 有利于疾病的检测和诊断。

震荡模块由药室、结合板、投药孔构成, 药室内存放药物, 结合板是磁性材料。由于外界永磁体产生的轴向磁吸引力, 药腔磁铁(上图紫色部分)被压缩, 粘膜粘附性药物具有高密度, 当达到临界压力时释放药物, 从而完成排药的过程。

通过上述结构设计方案, 对肠道疾病位置确定, 及时诊断, 药物投放有着很大的帮助, 从而具有较好的治疗效果。

## 2 运动仿真

### 2.1 平移运动分析

预先假设胶囊机器人表面受均匀压应力, 假设组织的有效摩擦系数为  $\mu$ 。根据公式 (1)、(2)、(3) 对胶囊机器人的位置与选项进行仿真计算, 分别确定胶囊机器人的磁通密度矢量, 力和转矩。

$$B(p) = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \oint_N \frac{B_r r}{4\pi|r|^3} dN - \oint_S \frac{B_r r}{4\pi|r|^3} dS \quad (1)$$

其中,  $B_r$  是剩余磁通量的密度,  $d_N$  和  $d_S$  分别代表永磁体的表面积元素,  $r$  表示相应元素到点  $P(x,y,z)$  的矢量。

$$F_x = F_{m,x} - \text{sgn}(v_c - \frac{h\dot{\theta}_c}{2})\mu F_{m,y} - \frac{1}{R_{ap}} \oint_{cont} xp(x,y)ds - Dv_c \quad (2)$$

其中,  $F_{m,x}$  和  $F_{m,y}$  分别为胶囊机器人和永磁体在  $x$  方向和  $y$  方向的磁力,  $\theta_c$  和  $v_c$  分别为胶囊机器人的旋转角度和平移速度,  $p_{x,y}$  是胶囊机器人表面积元素所受的压力,  $R_{ap}$  为接触面积下的前后半径,  $D$  是胶囊机器人的阻尼系数。

$$\Sigma T_c^{net} = T_m^c + \frac{1}{2}F_{m,y}h \sin \theta_c - [\text{sgn}(v_c - \frac{h\dot{\theta}_c}{2})\mu F_{m,y}] \cdot \frac{h \cos \theta_c}{2} - \oint_{con} xp(x,y)ds \quad (3)$$

其中,  $h$  是胶囊机器人的长度,  $T_m^c$  为外部磁场影响下的磁矩。

利用上述计算结果, 我们使用 MATLAB 进行建模。对胶囊机器人在磁流变液中的运动机理进行仿真分析, 我们将旋转速度和平移速度的比值定义为  $\epsilon$ 。当  $\epsilon$  大于 1 ( $\epsilon=1.5$ ), 即永磁体的旋转速度大于平移速度时, 永磁体驱动胶囊机器人进行平移运动达到最优状态。

理想曲线与实际曲线之间的关系:

在  $\epsilon=1$  和  $\epsilon<1$  时, 仿真情况下的位移轨迹均低于理论状态下的位移轨迹, 且有较大偏差。

在  $\epsilon=2(\epsilon>1)$  时, 仿真状况下的位移轨迹可以超过或接近理想状态下的位移轨迹。

在胶囊机器人滚动角的变化中, 仿真状态与理论值误差较小, 运动基本一致。

根据上述仿真分析, 得出以下结论:

由于磁场分布不均, 且胶囊机器人所处环境摩擦力等因素的影响, 理想状态下  $\epsilon=1$  时无法满足胶囊机器人平稳连续的平移运动。因此, 应增大  $\epsilon$  值, 增加旋转运动的比重, 将摩擦力更多的转化为平移运动的推动力, 实现机器人壳体平稳连续的旋转平移运动。

而滚动角的变化主要受自身旋转运动影响, 旋转运动受外界因素的影响较小, 故  $\epsilon$  的变化对角位移影响较小。

### 2.2 斜面运动分析

(下转第 58 页)

信号及时传递到 PLC 控制系统，便于该设备能够正常运行，完成货物的分拣工作。

### 2.3.2 分拣单元编程要点

技术人员在分拣单元编程控制中，应该关注设备使用阶段存在的问题，做好调试工作，有效降低设备使用阶段出现的误差。在工业机器人使用阶段，技术人员应该调整当前电动机的主动轴连轴的同轴度，确保该设备动力装置能够为工业机器人提供可靠的动力。通常情况下，技术人员按照工艺流程，合理设置程序软件，充分考虑设备使用阶段存在的异常情况，做好调试工作，以便于设备能够正常发挥自身重要作用，符合当前工业技术的需求，提高分拣工作效率。

### 2.3.3 分拣单元程序结构

在整体设备使用阶段，技术人员应该结合实际工况，重视对分拣控制程序的编写，整体编程技术较为简单，技术人员可以直接从主程序中编写。首先，程序设计人员需要结合传送带传感器的信号，判断当前设备是否处于运行状态，当工业机器人接收到传感器的信号之后，工业机器人应该处于运行状态。其次，工业机器人使用高速计数器编程，在不同的扫描周期内，完成对于传送带的扫描工作。当工件经过光纤探头和电感式传感器后，工业机器人对该种材料的颜色进行有效分析，便于判别工件的颜色。最后，工业机器人控制单元结合当前工作状况的需求，及时将黑色的工件拣起，让白色的工件直接通过该传送带。

### 2.3.4 人机界面交互

工业机器人的人机界面，可以对当前设备的运行情况进

行有效统计，工作人员可以通过对人机界面的操作，便于了解设备的性能。工业机器人在自动化生产线中有着重要作用，能够替代人工完成一些简单且重复程度较高的工作。并且，技术人员可以通过该界面，完成对设备的调试，有效更新不同的参数，便于该设备符合当前工程施工的需求。

在自动化分拣站日常工作中，工作人员需要对设备工作环节不同工件数据进行统计，便于了解当前工业生产中，不同工件的数目。通过人机界面，操作人员可以准确获得相关数据，并且及时将该数据做好记录，有利于控制当前工业生产，提高管理工作效率。随着企业生产的产品改变，技术人员还需要结合当前生产需求，做好程序设计，通过人机交互，完成程序的有效更新。

### 3 结语

总而言之，现阶段工业机器人在使用环节，对于工业生产有着较大的促进作用。企业管理人员重视对工业机器人的应用，对于增强现阶段企业自身技术水平有着重要作用。技术人员关注设备的电气控制系统，便于该设备能够更好地服务于企业自动化分拣站。

### 参考文献：

[1] 刘华锋,周俊荣,叶军林,等. 工业机器人在自动化生产线分拣站的应用 [J]. 锻压装备与制造技术,2020,55(02).  
 [2] 尹智龙.YL-335B 自动化生产线分拣方法的设计 [J]. 九江职业技术学院学报,2019(02).

作者简介: 李进 (1967.11-), 男, 汉族, 江苏泰州人, 本科学历, 高级工程师, 研究方向: 装备自动化、环保新材料、热塑工程。

(上接第 56 页)

数据采用 MATLAB 软件进行仿真模拟, 结果如图 2 所示。

根据仿真结果, 选取了 A,B,C,D 四点作为样本进行分析,

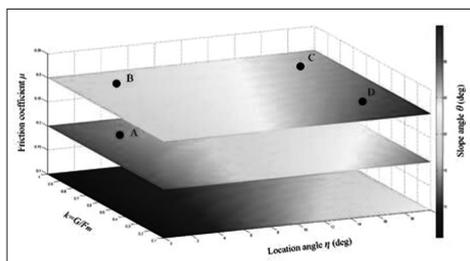


图 2 仿真模拟图

在其余条件相同的情况下，我们希望得到最大倾斜角。阐释如下：当  $k=0.2$ ，即磁吸引  $F_m$  是胶囊机器人重力  $G$  的 5 倍，重力和磁吸引夹角  $\eta=18^\circ$ ，摩擦系数  $\mu=0.3$  时，胶囊机器人在 D 点能够达到最大斜率角  $\theta$ （颜色反映了最大倾斜角的大小，颜色越亮表示斜率角越大）。同时采用控制变量的方法探究影响最大斜率角的因素：

a)A,B 两点以摩擦系数  $\mu$  为变量,  $\mu_B > \mu_A, \theta_B > \theta_A$ 。

b)B,C 两点以重力和磁吸引夹角  $\eta$  为变量,  $\eta_C > \eta_B, \theta_C > \theta_B$ 。

c)C,D 两点以重力与磁吸引之比  $k$  为变量,  $k_D < k_C, \theta_D > \theta_C$ 。

由上述仿真数据分析，得出以下结论：

当胶囊所在的斜面倾斜角大于最大斜率角时，磁吸引和重力的共同作用将会使胶囊滑落。最大斜率角  $\theta$  与摩擦系数  $\mu$  及重力和磁吸引夹角  $\eta$  呈正相关，与重力与磁吸引之比  $k$  呈负相关。需要说明的是，如果摩擦系数减小，由滚动引起的摩擦使胶囊机器人运动增大最大倾斜角。此外，当永磁体与胶囊机器人中心对齐时，磁吸引最大，这将导致在操作区的边界区域拟合误差的增大。可以预期，在水平面上工作时，磁吸引成为法向力的一部分，摩擦力促使胶囊上升，最大倾斜角将增大。

### 3 结语

本文的研究为胶囊机器人自主、稳定、可控的运动提供了可行的方案，为胶囊机器人运动和控制在研究以及今后广泛的临床应用奠定了基础。

### 参考文献：

[1] 孙志峻,杨建林. 胶囊机器人主动运动机构的研究进展 [J]. 机械制造与自动化,2020,49(03):1-7.  
 [2] 张永顺,王楠,马壮. 肠道胶囊机器人的转向随动力学模型 [J]. 机械工程学报,2012,48(01):84-90.  
 [3] 张永顺,于宏海,阮晓燕,王楠,郭东明. 新型肠道胶囊式微型机器人的运动特性 [J]. 机械工程学报,2009,45(08):18-23.