

1-2-2019

Optimum Design of Remote Delivery Capsule's Driving Mechanism Based on Electromagnetic-Permanent Magnet

Zhengping Lu

School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Xudong Guo

School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Tangcheng Xu

School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Ruihua Qin

School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimum Design of Remote Delivery Capsule's Driving Mechanism Based on Electromagnetic-Permanent Magnet

Abstract

Abstract: To achieve *fast, reliable and controllable drug delivery* in the gastrointestinal lesions, a suitable delivery driving mechanism was studied. The structure of the driving mechanism was designed to overcome the magnetic force decaying rapidly with distance, which *can satisfy the demands of the drug delivery for the large dose and long driving stroke*. By combining the orthogonal test theory and the finite element simulation, the magnetic driving force has been calculated for the parameters of the electromagnetic coil and permanent magnet in different combinations of the values. *The structure parameters of the electromagnetic coil and the permanent magnet have been optimized* to achieve the *maximum magnetic driving force within the limited space*. The magnetic field distribution of the magnetic driving mechanism is simulated by the optimized parameters. The simulation results show that the optimized magnetic driving force can satisfy the requirement of the medicine delivery, which provides a theoretical basis for developing the magnetic driving mechanism.

Keywords

site-specific drug delivery, drug release driver, repeatedly release, orthogonal test, finite element simulation, magnetic field distribution

Recommended Citation

Lu Zhengping, GuoXudong, Xu Tangcheng, Qin Ruihua. Optimum Design of Remote Delivery Capsule's Driving Mechanism Based on Electromagnetic-Permanent Magnet[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 747-752.

电磁-永磁式遥控施药胶囊驱动装置优化设计

鲁正平, 郭旭东, 许堂成, 秦锐华

(上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093)

摘要: 为对胃肠道病灶处实现快速、可靠、可控的药物输送, 研究了电磁-永磁式施药驱动装置。为克服磁力随距离迅速衰减, 设计了驱动装置的结构, 使其满足驱动行程大的药物释放需求; 并结合正交试验理论和有限元仿真计算不同参数的磁场驱动力, 优化电磁线圈和永磁体的结构参数, 以实现有限空间内的最优驱动力。采用优化后的参数对磁力驱动装置中的磁场分布进行了仿真。仿真验证表明: 优化后的驱动装置能满足施药所需的驱动力。为磁力驱动装置的实现提供了理论依据。
关键词: 定点药物释放; 施药驱动; 多次释放; 正交试验; 有限元仿真; 磁场分布

中图分类号: TP215; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 02-0747-06
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201802046

Optimum Design of Remote Delivery Capsule's Driving Mechanism Based on Electromagnetic-Permanent Magnet

Lu Zhengping, GuoXudong, Xu Tangcheng, Qin Ruihua

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To achieve fast, reliable and controllable drug delivery in the gastrointestinal lesions, a suitable delivery driving mechanism was studied. The structure of the driving mechanism was designed to overcome the magnetic force decaying rapidly with distance, which can satisfy the demands of the drug delivery for the large dose and long driving stroke. By combining the orthogonal test theory and the finite element simulation, the magnetic driving force has been calculated for the parameters of the electromagnetic coil and permanent magnet in different combinations of the values. The structure parameters of the electromagnetic coil and the permanent magnet have been optimized to achieve the maximum magnetic driving force within the limited space. The magnetic field distribution of the magnetic driving mechanism is simulated by the optimized parameters. The simulation results show that the optimized magnetic driving force can satisfy the requirement of the medicine delivery, which provides a theoretical basis for developing the magnetic driving mechanism.

Keywords: site-specific drug delivery; drug release driver; repeatedly release; orthogonal test; finite element simulation; magnetic field distribution

引言

胃肠道定点药物释放系统是用于治疗胃肠



收稿日期: 2016-01-13 修回日期: 2016-03-16;
基金项目: 上海市自然科学基金 (15ZR1428200);
作者简介: 鲁正平(1990-), 男, 河南郑州, 硕士生, 研究方向为精密工程与智能微系统; 郭旭东(1980-), 女, 湖南益阳, 博士, 副教授, 研究方向为精密工程与智能微系统。

道疾病和局部药物吸收研究的一种无创医疗系统^[1-2], 通常由定位装置、遥控装置和定点施药胶囊(Site-Specific Delivery Capsule, SSDC)三部分构成, 逐渐成为近年来国际医药领域研究的一个热点^[3]。

国内外在 SSDC 方面的研究都取得了一定的成果。SehyukYim 等人开发的磁力驱动药物释放胶囊^[4], 是用外部磁场驱动胶囊内部的两个永磁体互

相吸引实现施药功能,优点是施药速度可控,可多次释放,但携药量少,不足0.2ml。Wuyang Yu等人研发的胃肠道定点施药胶囊^[5],是当胶囊运动至目标位置时,胶囊内的磁簧开关受目标位置的永磁体影响接通,使镍铬合金丝发热熔断尼龙线令弹簧将药物释出,优点是体积小,施药速度快,但只能携带粉末状和固态药物,不能多次释放。Fredy Munoz等人研发的施药胶囊^[6],是利用外部磁场驱动胶囊内永磁体转动通过曲柄滑块装置带动活塞释放药物,优点是施药速度可控,产生的驱动力大,但不能用于粉末状药物和液态药物的释放。基于化学方法的微推进器装置^[7],是用推进剂燃烧生热使气体膨胀产生推力释放药物,优点是结构简单,施药速度快,但安全性较低。基于电化学原理的药物释放胶囊^[8],是用电化学反应产生氢气来推动活塞释放药物,优点是释放剂量可控,但施药速度缓慢,通常需半小时才可将药物完全释放。压缩弹簧式的施药驱动装置^[9],是用发热电阻熔断保险丝释放弹簧将药物释出,优点是施药速度快,结构简单,但不能进行多次释放。

本文提出一种电磁-永磁式的驱动方式,以实现药物释放的可控性,达到多次释放。首先,通过合理组合电磁线圈和永磁体,给出了驱动装置的初步设计;并结合正交试验理论和有限元仿真对驱动装置进行优化,进一步确定各个器件的参数和尺寸,以实现在有限的空间内获得最优的驱动力;然后根据各个器件的具体参数计算可实现药物释放所需的最小推力,并验证推动装置的可行性。

1 施药驱动装置的结构设计

施药胶囊的整体结构如图1所示。主要由外壳、施药单向阀、薄圆柱片、储药囊、施药驱动装置、微型电源与控制模块构成。

其中,施药驱动装置设计为电磁-永磁式,采用一对永磁体同轴线固定布置,再与可动式电磁线圈组合的结构。在设计的电磁-永磁式驱动装置中,只要

在线圈中通以设定方向的电流,即可使永磁体1吸引线圈而永磁体2排斥线圈,从而使得线圈上的驱动力能克服距离的衰减,完成大剂量释放药物的目标。

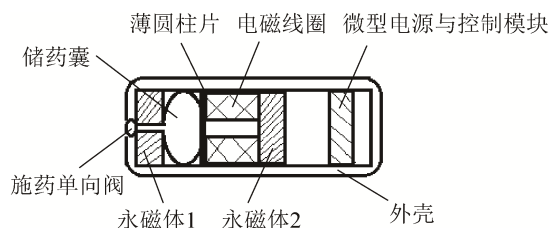


图1 施药胶囊结构简图

Fig.1 Structure diagram of drug delivery capsule

为保证药液能从施药口顺利释出,可在永磁体1的轴向上开一个与施药单向阀直径相同的小孔,都为2mm。单向阀可以保证药物不会在胶囊不工作的情况下随意从出药口撒漏,同时也可以防止肠道里的液体进入胶囊。为使驱动力能均匀施加至储药囊上,在线圈与储药囊的接触面上加一个薄圆柱片。

定点施药胶囊实现定点释放药物的工作流程为:在到达病变部位后,首先由外部射频信号发送遥控指令,触发胶囊内控制模块工作,使电磁线圈通以设定大小、方向 and 时间的电流,电磁线圈与永磁体之间产生合适的驱动力,从而推动线圈从出药口释出设定剂量的药物。

2 电磁-永磁式驱动装置的仿真优化

2.1 磁场驱动力的理论分析

运动电荷在磁场中所受的力,即洛伦兹力为

$$F_q = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

式中: \mathbf{v} 表示电荷 q 的运动速度; \mathbf{B} 表示磁感应强度矢量。

导体中电流由运动电荷产生,那么单位体积的载流导体在磁场中受力为

$$\Delta \mathbf{f} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

式中: \mathbf{J} 为传导电流密度。则磁场对载流导体总的作用力为^[10]:

$$F_m = \int_V \Delta \mathbf{f} dV = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{B} dV \quad (1)$$

式(1)中: V 为载流导体的体积; \mathbf{J} 和 \mathbf{B} 分别为导体

中传导电流密度矢量和磁感应强度矢量。

由公式(1)可知, 驱动力的大小与电磁线圈的电流密度、永磁体在电磁线圈处的磁感应强度正相关。假设线圈均匀绕制, 则电流密度为^[11]:

$$J = \frac{IN}{S} = \frac{UD_0^2}{\rho h_3 (D_1^2 - D_2^2)}$$

式中: I 为激励电流; N 为线圈匝数; S 为线圈电流传导区域的截面面积; 电磁线圈长度 h_3 , D_1 为线圈外径; D_2 为线圈内径; ρ 为线圈绕线的电阻率; 线圈绕线线径为 D_0 ; 电源电压为 U 。

根据相关文献[12], 取胶囊的总长为 30mm, 直径 11 mm, 储药容量设计为 0.76 ml, 则储药仓长度 h_2 需 8 mm, 为微型电源和控制模块预留 10 mm, 且两永磁体厚度均为 h_1 , 则有 $2h_1+h_3=12$ mm, 而线圈处的磁感应强度又取决于永磁体的剩磁强度和体积等因素, 综上可知, 若电压 U 、线圈外径 D_1 和永磁体直径固定, 则驱动力的主要影响因素有: 线圈内径 D_2 , 线圈长度 h_3 和线圈线径 D_0 。由于影响因素较多, 且驱动力的解析表达式较复杂, 因此采用正交试验理论结合有限元软件仿真计算磁场驱动力进行优化。

2.2 基于正交试验理论的驱动装置优化设计

2.2.1 各因素试验水平的确定

使用 Ansoft Maxwell 软件来仿真磁场驱动力, 采用 Maxwell 2D 静磁场求解器, 建立磁力驱动装置的二维轴对称模型, 激励电压 $U=3V$, 固定线圈外径 D_1 和永磁体直径都为 11mm, 固定线圈行程为 4mm, 则可根据已有参数来仿真计算线圈长度 h_3 , 线圈内径 D_2 , 线圈线径 D_0 三者取不同值时的驱动力^[13]。考虑本磁力驱动装置的实际设计情况, 取线圈长度 h_3 的水平为 4mm, 5mm, 6mm, 7mm; 取线圈内径 D_2 的水平为 1mm, 2mm, 3mm, 4mm。

当 $h_3=7$ mm, $D_2=1$ mm 时线圈线径 D_0 的单因素试验仿真结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 线径 D_0 越大驱动力越大, 且当

线径 D_0 超过 0.18 mm 时, 激励电流就超过了安全电流, 且由于这是极端情况, 所以综合考虑选择 0.14 mm, 0.15 mm, 0.16 mm, 0.17 mm 四个水平。

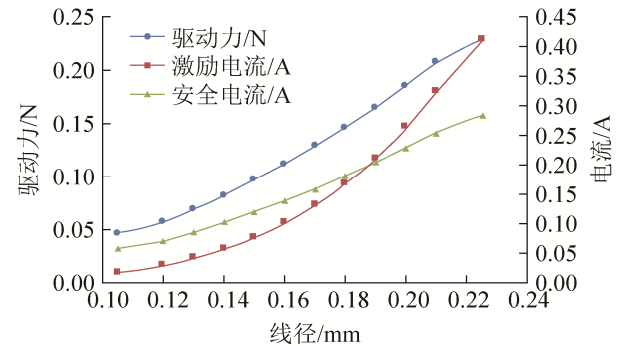


图 2 线径 D_0 的单因素试验仿真结果

Fig.2 Single-factor experimental results of wire diameter D_0

2.2.2 驱动力的正交试验仿真优化

将各因素的试验水平进行随机化处理, 依次抽签得因素水平表如表 1 所示。

表 1 驱动力试验的因素水平表
Tab.1 Factor levels of driving force test

水平	因素		
	线圈长度/mm	线圈内径/mm	线圈线径/mm
1	5	1	0.17
2	7	4	0.16
3	4	2	0.15
4	6	3	0.14

选择 $L_{16}(4^5)$ 正交表按照表 1 进行正交试验设计, 试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 各因素对驱动力大小的影响程度由大到小依次为: 线圈长度 h_3 >线圈线径 D_0 >线圈内径 D_2 。且可绘制出驱动力随各因素的变化趋势如图 3 所示。

由图 3 可看出, 线圈长度 h_3 越小驱动力越大, 而线圈线径 D_0 越大驱动力越大。

正交试验结果方差分析如表 3 所示。

由于 $F_{0.95}(3, 3)=9.28$, $F_{0.99}(3, 3)=29.46$, 因此可看出线圈长度 h_3 和线圈线径 D_0 对驱动力大小的影响非常显著, 但线圈内径 D_2 的影响不显著。

表 2 驱动力试验结果极差分析表

Tab. 2 Range analysis of driving force test

试验号	因素			驱动 力/N	
	线圈长度/ mm	线圈内径/ mm	线圈线径/ mm		
1	1	1	1	1	0.196
2	1	2	2	2	0.185
3	1	3	3	3	0.150
4	1	4	4	4	0.131
5	2	1	2	3	0.112
6	2	2	1	4	0.139
7	2	3	4	1	0.084
8	2	4	3	2	0.101
9	3	1	3	4	0.178
10	3	2	4	3	0.163
11	3	3	1	2	0.241
12	3	4	2	1	0.216
13	4	1	4	2	0.102
14	4	2	3	1	0.130
15	4	3	2	4	0.143
16	4	4	1	3	0.168
k_1	0.166	0.147	0.186	0.157	
k_2	0.109	0.154	0.164	0.157	
k_3	0.200	0.154	0.140	0.148	
k_4	0.136	0.154	0.120	0.148	
R	0.091	0.007	0.066	0.009	

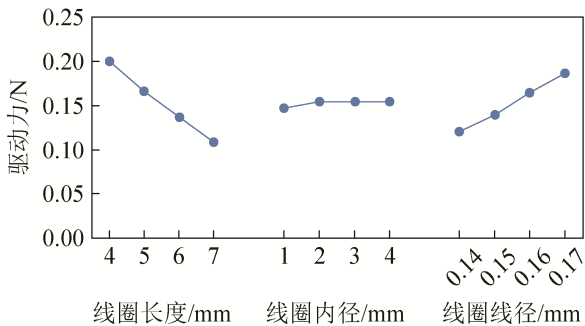


图3 驱动力随各因素的变化趋势图

Fig.3 Trend diagram of driving force with various factors

表3 正交试验结果方差分析

Tab. 3 Variance analysis of orthogonal test

方差来源	S	f	\bar{S}	F	显著性
h_3	1.8×10^{-2}	3	6.1×10^{-3}	106.646	非常显著
D_2	1.6×10^{-4}	3	5.3×10^{-5}	0.927	不显著
D_0	9.9×10^{-3}	3	3.3×10^{-3}	57.961	非常显著
误差	3.4×10^{-4}	6	5.7×10^{-5}		

按照分析结果, 线圈长度 h_3 应越小越好, 线

圈线径 D_0 应越大越好, 但这都会导致电流很大, 因此可根据线圈线径的安全电流来反推线圈参数, 取线圈线径从小到大 0.13 mm, 0.14 mm, 0.15 mm, 0.16 mm, 0.17 mm, 0.18 mm, 0.19 mm, 0.2 mm 8 个值分别反推线圈参数并进行有限元仿真计算驱动力大小, 可知线径很小线圈长度很小和线径很大线圈长度很大时驱动力都不大, 最佳方案在二者都适中的时候, 最后综合选取出的最优方案线圈长度为 5.78 mm, 线圈线径为 0.17 mm, 线圈内径为零, 永磁体长度为 3.11 mm, 此时驱动力 $F_m=0.167$ N 为最优, 经过计算, 胶囊此时对肠道壁的最大压力为 2.1 KPa, 远小于肠道能够承受的最大压力^[14], 且可用软件画出此时的驱动装置磁场分布图如图 4 所示。

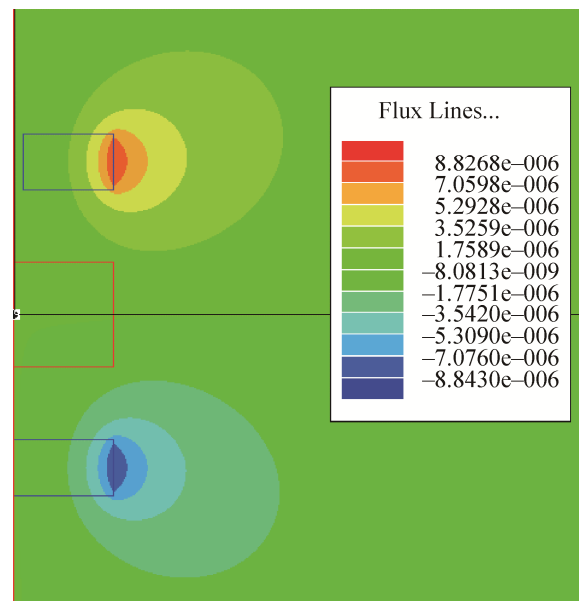


图4 驱动装置磁场分布图

Fig.4 Magnetic field distribution diagram of driving mechanism

图 4 为磁力驱动装置的二维轴对称模型, 从图中可看出, 驱动装置中的磁场主要由两个永磁体产生, 且二者极性相反, 磁性大小基本相同, 永磁体轴线上所开的小孔对其磁性强弱并无太大影响, 仅损失了 0.22%, 而电磁线圈产生的磁场则要比永磁体微弱的多, 因此在图中显示不出来, 所以本文设计的驱动装置中永磁体的磁性占主导地位, 使用两

个永磁体加一个线圈的结构要比两个电磁线圈加一个永磁体的结构更可行, 且更加节省能耗, 绿色环保, 驱动力也更大, 但不足之处是相比于两个电磁线圈加一个永磁体的结构, 可控性不如后者强。

3 施药驱动力验证分析

3.1 单向阀开启压力的分析设计

为了验证驱动装置的驱动力是否达到药物释放的要求, 需要结合单向阀的开启压力进行计算, 胶囊不施药时单向阀始终是关闭的, 因此当胶囊的出药口竖直向下时, 单向阀受到的压力最大, 设单向阀的开启压力为 P_S , 忽略活塞重力及活塞与囊壁间摩擦力, 此时若有

$$P_S \geq \frac{g}{D_1^2} [\rho_1 h_2 D_1^2 + \rho_2 h_3 (D_1^2 - D_2^2)] \quad (2)$$

成立, 那么此单向阀的设计即为合理的。取药液密度 $\rho_1 (1.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3)$, 线圈材料是铜, 密度是 $\rho_2 (8.96 \times 10^3 \text{kg/m}^3)$, 结合前文优化得出的参数代入公式(2)可求得: $P_S \geq 602 \text{ Pa}$ 。

根据式(2), 将单向阀的开启压力 P_S 设计为 602 Pa 。

3.2 施药驱动力验算与可行性分析

为了验证驱动装置的驱动力是否达到药物释放要求, 需考虑释放药物所需的最大驱动力的情况, 即: 胶囊出药口竖直朝上的情况。则驱动力 F_m 需满足以下关系式:

$$(F_m - G_1 - G_2) \frac{4}{\pi D_1^2} > P_S \quad (3)$$

由(2)、(3)可求得

$$F_m > 0.114 \text{ N} \quad (4)$$

由于线圈行程 d 变化时, 驱动力 F_m 也会随之变化, 可用软件仿真出驱动力随行程的变化曲线如图5所示。

由图5可以看出, 驱动力始终满足(4)式, 因此此施药驱动装置是可行的。

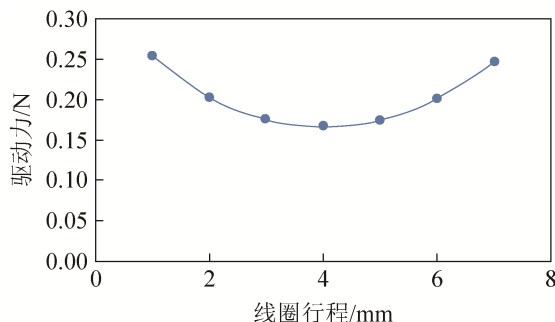


图5 驱动力大小与行程关系图

Fig.5 Relation between the driving force and stroke

4 结论

本文从理论、实验与仿真计算相结合的角度出发, 研究适用于胃肠道定点药物释放系统的施药驱动原理, 对病灶处实现快速、可靠的定点药物输送。首先提出了一种新型的电磁-永磁式的驱动方式, 并采用了有限元仿真建模计算了磁场驱动力; 而驱动装置的结构参数对驱动力影响较大, 为了优化设计线圈和永磁体的结构参数, 引入了正交试验理论, 结合有限元分析计算, 得到了最佳的参数, 并仿真了此时的驱动装置磁场分布图, 且从中得出了一些有用的结论; 最后, 根据确定的结构参数验算了所设计的驱动装置, 验证了该释药方式切实可行。并且, 可通过控制电磁线圈的通电时间, 实现药物的多次释放功能。

在驱动装置仿真优化设计的基础上, 下一步拟开发定点药物释放系统的样机, 测试验证驱动装置的驱动力和释药可靠性, 并完成动物实验验证, 为实现体内窥视、诊疗一体化的胶囊状微型机器人系统的实用化技术提供理论基础和实验依据。

参考文献:

- [1] Munoz F, Alici G, Li W. A review of drug delivery systems for capsule endoscopy[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews* (S0169-409X), 2014, 71(7): 77-85.
- [2] Dietzel C T, Hendryk R, Sandra A, et al. Magnetic active agent release system (MAARS): evaluation of a new way for a reproducible, externally controlled drug release into the small intestine[J]. *Journal of Controlled Release* (S0168-3659), 2012, 161(3): 722-727.
- [3] 杨闯, 陈杨技. 胃肠道定点药物释放胶囊的释药控制

- 方式的分类[J]. 机电工程技术, 2013, 42(1): 37-40.
- Yang Chuang, Chen Yang-zhi. Research on medicine trigger control way of gastrointestinal drug site-specific release capsule[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2013, 42(1): 37-40.
- [4] Yim S, Goyal K, Sitti M. Magnetically actuated soft capsule with the multimodal drug release function[J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics (S1083-4435), 2013, 18(4): 1413-1418.
- [5] Yu W, Rahimi R, Ochoa M, et al. A smart capsule with GI-tract-location-specific payload release[J]. IEEE transactions on bio-medical engineering (S0018-9294), 2015, 62(9): 2289-2295.
- [6] Munoz F, Alici G, Li W. Optimization of multiple arc-shaped magnets for drug delivery in a capsule robot[C]// Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on Busan, 2015: 189-195.
- [7] 燕雪萍. 基于颜色识别的肠道出血智能施药胶囊研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012: 31-33.
- Yan Xueping. Research on an intelligent electronic capsule for automated color detection of gastrointestinal bleeding[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012: 31-33.
- [8] 崔建国, 刘红英. 基于电化学原理的消化道释药电子胶囊研究[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(5): 54-56.
- Cui Jian-guo, Liu Hong-ying. Research on electronic capsule for digestive tract drug delivering based on electrochemical theory[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(5): 54-56.
- [9] 曾昭旺. 磁控微型释药机器人动作触发可靠性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 11-27.
- Zeng Zhaowang. Research on triggering reliability of magnetic-control drug release micro-robot[D]. Guangzhou, China: South China university of Technology, 2010: 11-27.
- [10] 颜威利. 电气工程电磁场数值分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 214-232.
- Yan Weili. Numerical analysis of electromagnetic field in Electrical Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 214-232.
- [11] 陈二虎, 袁志勇, 余泽江, 等. 虚拟手术系统中电磁力反馈建模仿真与实现[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 2003-2008.
- Chen Erhu, Yuan Zhiyong, Yu Zejiang, et al. Modeling, Simulation and Implementation of Electromagnetic Force Feedback in Virtual Surgery System[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9): 2003-2008.
- [12] Woods S P, Constantinou T G. Wireless capsule endoscope for targeted drug delivery: mechanics and design considerations[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering (S0018-9294), 2013, 60(4): 945-953.
- [13] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 126-163.
- Liu Guoqiang, Zhao Lingzhi, Jiang Jiya. Finite element analysis of electromagnetic field by Ansoft Maxwell[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 126-163.
- [14] 梁亮, 彭辉, 胡冠昱, 等. 螺旋微型机器人对人体肠道壁损伤的数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(3): 460-464.
- Liang Liang, Peng Hui, Hu Guanyu, et al. Numerical Simulations on Injury to Human Intestinal Walls Produced by Spiral Micro-robots[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(3): 460-464.