

6-14-2018

## Algorithm for Tracking Position and Orientation of Drug Delivery Capsules in Gastrointestinal Tract

Xudong Guo

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

Zhengping Lu

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

Qinfen Jiang

*2.Department of Information Technology, East Hospital, Tongji University School of Medicine, Shanghai 200120, China;*

Shuyi Wang

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

*See next page for additional authors*

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 Original Article 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.

---

# Algorithm for Tracking Position and Orientation of Drug Delivery Capsules in Gastrointestinal Tract

## Abstract

**Abstract:** To realize an accurate releasing by a drug-delivery capsule in the gastrointestinal tract, a method of magnetic vector detection with angle sensing has been presented to track the capsule in real time; and a prototype of the tracking system has been developed. Based on the fundamentals of spatial distribution of magnetic vector fields, a nonlinear model of tracking is established. An improved artificial bee colony algorithm is studied to solve the magnetic inverse problem. In the improved algorithm, a chaos operator is used to generate an initial population and a sort selection is used to prevent premature convergence. To accelerate the convergence speed in the later stage, the Levenberg-Marquardt algorithm is combined with the artificial bee colony algorithm. The algorithm simulation experiment shows that the average number of iterations is 215. The average position error and standard deviation of x, y and z are  $0.0022\text{ m} \pm 0.00012\text{ m}$ ,  $0.0019\text{ m} \pm 0.000084\text{ m}$ , and  $0.0020\text{ m} \pm 0.000078\text{ m}$ , respectively. The nonlinear optimization problem of tracking can be rapidly and accurately solved.

## Keywords

drug delivery capsules, magnetic vector detection with angle sensing, solving of a magnetic inverse problem, an artificial bee colony algorithm

## Authors

Xudong Guo, Zhengping Lu, Qinfen Jiang, Shuyi Wang, and Haipo Cui

## Recommended Citation

Guo Xudong, Lu Zhengping, Jiang Qinfen, Wang Shuyi, Cui Haipo. Algorithm for Tracking Position and Orientation of Drug Delivery Capsules in Gastrointestinal Tract[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2288-2294.

## 胃肠道给药胶囊的方位跟踪求解算法

郭旭东<sup>1</sup>, 鲁正平<sup>1</sup>, 蒋琴芬<sup>2</sup>, 王殊轶<sup>1</sup>, 崔海坡<sup>1</sup>

(1.上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2.同济大学附属东方医院(上海市东方医院)信息中心, 上海 200120)

**摘要:** 为实现给药胶囊在胃肠道内的精准药物释放, 其方位跟踪采用倾角传感式磁矢量检测法, 设计开发了磁跟踪系统的原理样机。基于磁矢量空间分布, 建立了方位跟踪的数学模型。研究了排序选择的混沌蜂群Levenberg-Marquardt算法, 引入混沌序列改进初始解生成, 并采用排序选择策略避免算法早熟, 在算法后期引入L-M算法加快收敛。仿真实验表明: 算法平均迭代次数215次, x、y、z分量平均跟踪误差和标准偏差为 $0.0022\text{ m}\pm 0.00012\text{ m}$ 、 $0.0019\text{ m}\pm 0.000084\text{ m}$ 、 $0.0020\text{ m}\pm 0.000078\text{ m}$ , 快速准确地求解了跟踪问题。

**关键词:** 给药胶囊; 倾角传感式磁检测; 磁场逆问题求解; 人工蜂群算法

中图分类号: TH773; TP212.13

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2288-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806036

## Algorithm for Tracking Position and Orientation of Drug Delivery Capsules in Gastrointestinal Tract

Guo Xudong<sup>1</sup>, Lu Zhengping<sup>1</sup>, Jiang Qinfen<sup>2</sup>, Wang Shuyi<sup>1</sup>, Cui Haipo<sup>1</sup>

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

2.Department of Information Technology, East Hospital, Tongji University School of Medicine, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** To realize an accurate releasing by a drug-delivery capsule in the gastrointestinal tract, a method of magnetic vector detection with angle sensing has been presented to track the capsule in real time; and a prototype of the tracking system has been developed. Based on the fundamentals of spatial distribution of magnetic vector fields, a nonlinear model of tracking is established. An improved artificial bee colony algorithm is studied to solve the magnetic inverse problem. In the improved algorithm, a chaos operator is used to generate an initial population and a sort selection is used to prevent premature convergence. To accelerate the convergence speed in the later stage, the Levenberg-Marquardt algorithm is combined with the artificial bee colony algorithm. The algorithm simulation experiment shows that the average number of iterations is 215. The average position error and standard deviation of x, y and z are  $0.0022\text{ m}\pm 0.00012\text{ m}$ ,  $0.0019\text{ m}\pm 0.000084\text{ m}$ , and  $0.0020\text{ m}\pm 0.000078\text{ m}$ , respectively. The nonlinear optimization problem of tracking can be rapidly and accurately solved.

**Keywords:** drug delivery capsules; magnetic vector detection with angle sensing; solving of a magnetic inverse problem; an artificial bee colony algorithm

引言<sup>1</sup>

现代生活节奏的加快及生活压力的增加, 使慢

性消化道疾病的发病率逐年提高。口服药物难以直接到达病灶部位或到达病灶剂量过小, 若能在炎症、创面、病灶处直接高效地进行给药治疗, 既可增强药物的吸收实现高效治疗, 并能减小药物的副作用。

目前, 胶囊内窥镜<sup>[1-2]</sup>主要用于获取消化道内的图像。为实现定点给药等介入医疗操作, 可开发



收稿日期: 2016-07-28 修回日期: 2016-11-10;  
基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61001164),  
上海市自然科学基金(15ZR1428200);  
作者简介: 郭旭东(1980-), 女, 湖南益阳, 博士, 副教授, 研究方向为智能医用电子设备与医用测控技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2288 •

胶囊状遥控给药装置, 待其达到施药的目标区域, 由体外遥控装置发出指令, 驱动体内给药装置的致动器定点输送药物<sup>[3-5]</sup>。其中, 实时跟踪给药胶囊在消化道内方位是关键技术之一。目前在胶囊内镜跟踪方法<sup>[6-8]</sup>有诸多研究成果, 但在求解速度、跟踪方法的适用性等方面有所局限。考虑到人体介质的非导磁性, 且为减少跟踪未知量个数、缩短每轮跟踪的采样时间, 提出了倾角传感式磁矢量检测法, 建立了胶囊方位和空间磁场信号的数学模型, 获得了以方位参数为未知量的非线性方程组。为便于求解磁场逆问题, 将非线性方程组的求解问题转化为目标函数的优化问题。由于方位跟踪目标函数的多峰性, 且全局最优点的周围被坏点包围, 如果搜索方法的选择不当, 易于导致算法过早陷入局部极值点, 因此研究了排序选择的混沌蜂群 L-M 算法, 使算法能快速、准确地收敛到最优解。

## 1 倾角传感式磁跟踪原理

### 1.1 倾角传感式磁跟踪系统设计

遥控施药胶囊的磁跟踪系统包括自动增益式磁场发生装置、倾角式无线磁传感装置、无线数据接收装置、数据处理平台。其中, 倾角式无线磁传感装置封装在电子胶囊内, 其余装置都处于体外。四个励磁线圈布置于体表腹部上, 如图 1 所示。磁场发生装置依次对 4 个励磁线圈激磁, 在空间产生交变磁场。倾角式无线磁传感装置检测胶囊所处方位的磁场信号和倾角信号, 并将其无线传输到体外的无线数据接收装置。

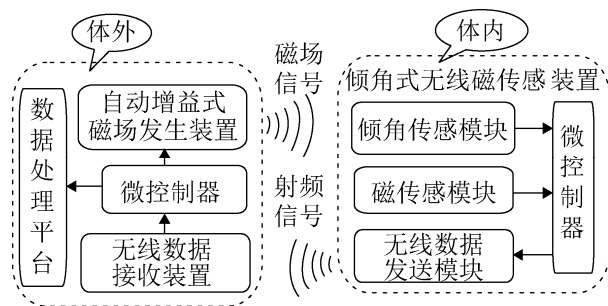


图 1 系统总体框图  
Fig. 1 Diagram of the system

倾角式无线磁传感装置主要包括倾角传感模块、磁传感模块、微控制器、无线数据发送模块。各模块的样机如图 2 所示。

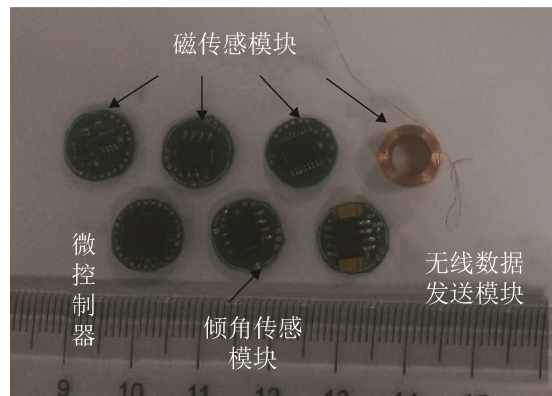


图 2 倾角式无线磁传感装置各模块  
Fig. 2 Modules of the wireless magnetic sensor with angle measurement

磁传感模块采用电磁感应的原理, 将交变磁信号转换为电信号, 主要包括: 接收线圈与 3 个电路模块, 如图 2 所示。其中, 3 个电路模块分别为: 可编程放大及滤波电路模块、均方根值拾取电路模块、采样与 AD 转换及信号控制电路模块。这 4 个模块采用层叠的组装方式, 固定放置在给药胶囊的一端。安装时, 使磁传感模块与倾角传感模块固连, 以接收线圈的几何中心点为坐标原点  $o'$ , 旋转中心轴为  $o'z'$  轴, 建立动坐标系  $o'-x'y'z'$ , 且使  $o'x'$ 、 $o'y'$ 、 $o'z'$  方向分别平行于倾角传感模块的 3 个轴向。由于励磁线圈在接收线圈处产生的交变磁场信号与接收线圈的空间方位相关, 且接收线圈将交变磁场信号转换为电信号, 由此实现了空间方位信号的传感和测量。

### 1.2 磁跟踪模型的建立

建模思路为: 基于单匝圆电流的磁场模型, 进而推导载流圆柱线圈的空间电磁场分布函数式。为便于求解和分析, 设人体肚脐为坐标原点  $o$ , 平行于脊椎、指向颈部为  $y$  轴正向, 垂直于体表、指向体内设为  $z$  轴正方向, 建立基准坐标系  $o-xyz$ 。磁跟踪系统中的 4 个励磁线圈均为轴向平行的圆柱

形线圈,因此,设载流圆柱线圈轴向均平行于z轴,线圈匝数为 $n$ ,内、外半径分别为 $a_1$ 、 $a_2$ ,通入正弦励磁电流 $I = I_p \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ ,其中 $I_p$ 为励磁信号的幅值, $\omega$ 为角频率, $\varphi$ 是初始相位。

首先,半径为 $a_0$ 、电流为 $I$ 的单匝圆电流在点 $P(\rho, \phi, z)$ 处的磁矢势为:

$$\overline{\mathbf{A}}_p = A_p \cdot \overline{e}_\phi = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a_0 \cos \theta d\theta}{R} \overline{e}_\phi \quad (1)$$

经过积分、化简可得<sup>[9]</sup>:

$$A_p = \frac{\mu_0 \cdot I}{\pi k} \cdot \sqrt{\frac{a_0}{\rho}} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{1}{2} k^2 \right) K - E \right] \quad (2)$$

式中:K、E分别为第一类和第二类完全椭圆积分。即:

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}} \quad (3)$$

$$E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (4)$$

$$k = \sqrt{\frac{4a\rho}{z^2 + (a + \rho)^2}} \quad (5)$$

由此,根据表达式 $\overline{\mathbf{B}} = \nabla \times \overline{\mathbf{A}}_p$ ,并结合建模思路可得:若跟踪系统中圆柱形励磁线圈的几何中心位于基准坐标系 $o-xyz$ 的原点,接收线圈的几何中心点在基准坐标系的坐标为 $(x,y,z)$ ,则励磁线圈在场点 $(x,y,z)$ 处的磁感应强度沿直角坐标轴的分量 $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ 分别为:

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot x}{\rho^2 \sqrt{(a + \rho)^2 + z^2}} \cdot \left[ \frac{\rho^2 + z^2 + a^2}{(a - \rho)^2 + z^2} E - K \right] \quad (6)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{z \cdot y}{\rho^2 \sqrt{(a + \rho)^2 + z^2}} \cdot \left[ \frac{\rho^2 + z^2 + a^2}{(a - \rho)^2 + z^2} E - K \right] \quad (7)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(a + \rho)^2 + z^2}} \cdot \left[ \frac{a^2 - \rho^2 - z^2}{(a - \rho)^2 + z^2} E + K \right] \quad (8)$$

式中: $a = (a_1 + a_2) / 2$ ,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

倾角传感模块测量的姿态角采用欧拉角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 表示,坐标系旋转顺序为Z-Y-X,并且,接收线圈横截面积 $s$ 的法向矢量方向沿 $o'z'$ ,可得:

$$B_z = -\sin \beta \cdot B_x + \cos \beta \cdot \sin \gamma \cdot B_y + \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot B_z \quad (9)$$

由式(9)可知,当接收线圈的几何中心点在基准坐标系的坐标为 $(x,y,z)$ 时,其输出的电动势 $e$ 为:

$$e = \frac{d(-\sin \beta \cdot B_x + \cos \beta \cdot \sin \gamma \cdot B_y + \cos \beta \cdot \cos \gamma \cdot B_z)}{dt} \cdot s \quad (10)$$

将式(6)、(7)、(8)代入式(10),则可得到接收线圈的输出电动势 $e$ 与接收线圈在基准坐标系中的3个位置参数 $(x,y,z)$ 、3个姿态角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 之间的函数关系式。其中,3个欧拉角可由倾角传感模块测出,因此跟踪模型中包含的未知数仅为3个,简化了求解。

## 2 排序选择的混沌蜂群L-M算法

### 2.1 跟踪目标函数分析

在标准人工蜂群优化算法<sup>[10]</sup>中,蜜源的位置即对应了优化函数的1个可行解,蜂群寻找最优蜜源的过程就是搜索函数最优解的过程,最优蜜源的位置则是函数的最优解。

在跟踪系统中,每个励磁线圈工作时,磁传感模块中接收线圈输出的电动势 $e_i$ 与胶囊的位置 $(x,y,z)$ 之间都可确立如式(10)所示的数学表达式,4个励磁线圈可联立得到1个非线性方程组。记为如式(11)。

$$f_i(\mathbf{A}) = e_i \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

式中: $f_i$ 为方程组中第 $i$ 个方程; $e_i$ 为第 $i$ 个方程对应的常量,即第 $i$ 个励磁线圈激磁时接收线圈输出的电动势; $\mathbf{A}$ 为未知数向量,即为所求的胶囊位置坐标,记为 $\mathbf{A} = [x, y, z]^T$ 。

此时,3个位置坐标作为待求未知量构成三元非线性方程组,将上述非线性方程组求解问题转换为求目标函数 $\varepsilon(\mathbf{A})$ 极小值时的向量 $\mathbf{A}$ ,即:

$$\min \{ \varepsilon(\mathbf{A}) \} = \min \left\{ \sum_{i=1}^4 (f_i(\mathbf{A}) - e_i)^2 \right\} \quad (12)$$

为避免出现过早收敛陷入局部极值和停滞现象的发生,且提高收敛速度,对人工蜂群算法进行改进:一方面,引入混沌序列方式使初始解的生成具有多样性、遍历性良好;另一方面,为避免过早

陷入局部极值,使坏点在算法早期也能有较大的概率被选中,采用了排序式选择策略;此外,将人工蜂群算法与 L-M 优化算法相结合,加快后期收敛速度。

## 2.2 算法的改进原理

假设初始种群含有  $s$  个解,即引领蜂或跟随蜂的数量均为  $s$ ;优化函数的每个可行解  $\mathbf{A}_i(i=1,2,\dots,s)$  是一个 3 维向量,即蜜源的位置。

初始解的生成引入了 logistic 混沌序列法,采用下式产生混沌序列  $\{x_n\}$ :

$$x_{n+1} = \mu \cdot x_n \cdot (1 - x_n) \quad (13)$$

式中:  $\mu$  取值为 4;  $x_n \in (0,1)$ 。

给定 3 个不同的初值产生 3 个序列,分别记为  $\{x_n^1\}$ 、 $\{x_n^2\}$ 、 $\{x_n^3\}$ 。从序列的第 500 项开始取值,并且为了使生成的混沌序列分布在解空间,采用如下归一化处理:

$$\mathbf{A}_{ij} = l_j + x_{500+i}^j \cdot (u_j - l_j) \quad (14)$$

$i$  为初始解的标号,  $i \in \{1,2,\dots,s\}$ ,  $s$  为初始解的总数目;  $j$  为解的维数,  $j \in \{1,2,3\}$ ;  $l_j$  和  $u_j$  分别表示解的第  $j$  维变量的取值下界和上界。由此可生成初始解  $\mathbf{A}_i$ 。

首先,引领蜂对每一个蜜源位置  $\mathbf{A}_i$  进行一次邻域搜索,根据式(15)进行更新:

$$\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{A}_{ij} + \varphi_{ij}(\mathbf{A}_{ij} - \mathbf{A}_{kj}) \quad (15)$$

式中:  $j \in \{1,2,3\}$ ;  $k \in \{1,2,\dots,s\}$ ;  $k$  是随机选取的,且必须不等于  $i$ ;  $\mathbf{v}_{ij}$  为新蜜源的位置;  $\varphi_{ij}$  为随机数,取值范围为  $[-1,1]$ 。

若更新后新蜜源的收益率  $\varepsilon(\mathbf{A})$  高于原蜜源时,用新蜜源位置代替原位置;否则仍保持对原蜜源的开采。如下所示:

$$\mathbf{A}_{ij} = \begin{cases} \mathbf{v}_{ij}, & \varepsilon(\mathbf{v}_{ij}) < \varepsilon(\mathbf{A}_{ij}) \\ \mathbf{A}_{ij}, & \varepsilon(\mathbf{v}_{ij}) \geq \varepsilon(\mathbf{A}_{ij}) \end{cases} \quad (16)$$

当引领蜂完成搜索后,跟随蜂按排序式选择策略选择蜜源。先计算各蜜源的适应度值:

$$fit(\mathbf{A}_i) = \frac{1}{1 + \varepsilon(\mathbf{A}_i)} \quad (17)$$

式中:  $fit(\mathbf{A}_i)$  为第  $i$  个解的适应度。

将各蜜源排序,右下标表示各蜜源的适应值函数从大到小排序后的序号,  $s$  表示蜜源位置的总数目:

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \dots > \varepsilon_s \quad (18)$$

若某蜜源位置  $\mathbf{A}_i$  对应的适应值函数值在序列中的序号为  $n$ ,则其对应的选择概率为:

$$P_i = \frac{n}{0.5 \cdot s(s+1)} \quad (19)$$

跟随蜂在蜜源附近搜索,根据公式(15)产生新的蜜源位置。

当某蜜源经过 Limit 次循环后仍无改善,且其收益率又不是当前最优,则此蜜源被放弃,与此蜜源对应的跟随蜂转换为侦察蜂,根据下式重新随机初始化蜜源位置,取代被放弃的蜜源位置:

$$\mathbf{A}_i^j = \mathbf{A}_{\min}^j + \text{rand}(0,1) \cdot (\mathbf{A}_{\max}^j - \mathbf{A}_{\min}^j) \quad (20)$$

当蜜源的适应度函数与最优值的误差小于设定值时,该蜜源被作为疑似最优解,采用 Levenberg-Marquart(L-M)算法在其邻域附近进行局部寻优。L-M 算法既可避免高斯-牛顿法中 Jacobian 矩阵病态和假收敛的缺点,又可避免梯度下降法在极值点附近收敛慢的缺点。

## 2.3 算法程序流程

综上所述,排序选择的混沌蜂群 L-M 算法的程序步骤设计如下:

- 1) 参数初始化。设置引领蜂的个数、跟随蜂的个数,设定 Limit 的值,并根据混沌算子产生初始蜜源的位置。第  $i$  个蜜源位置记为  $\mathbf{A}_i = (\mathbf{A}_{i1}, \mathbf{A}_{i2}, \mathbf{A}_{i3})$ 。设定 L-M 算法初始常数的值,包括阻尼因子的初始值  $\mu_0$ 、阻尼因子调节系数  $\beta_1$  和  $\beta_2$ 。
- 2) 计算各蜜源位置的适应度值  $\varepsilon(\mathbf{A}_i)$ 。
- 3) 每个引领蜂对应一个蜜源位置,根据式(15)进行位置更新,并计算新位置的适应度。
- 4) 引领蜂采用个体贪婪法则,选择或放弃新位置。
- 5) 将引领蜂储存的蜜源位置的适应度函数从

大到小进行排序,按照排序法计算选择概率,跟随蜂根据选择概率选择蜜源位置。

6) 跟随蜂根据式(15)进行位置更新,并计算新位置的适应度。

7) 采用贪婪法则,选择或放弃新位置。

8) 判断是否有经过  $\text{limit}$  次迭代无改善而需要放弃的解,若有,则产生新的解取而代之。

9) 存储适应度值最好的蜜源位置,判断最好适应值是否小于  $e_0$ ,且是否达到允许的迭代次数  $\text{max}$ 。若两者都不满足,则直接跳转至步3)。若满足前一个条件,但不满足后一个条件,则保存当前最好的蜜源作为 L-M 寻优的种子;同时将该蜜源从群体中剔除,并按式(20)产生一个新蜜源取代,跳转至步3)。若满足后一个条件,则跳转至步10),且变量  $m$  赋初值为1。

10) 将蜂群算法确定的第  $m$  个疑似最优解的种子,作为 L-M 算法初始的可行解向量  $\mathbf{A}^0$ ,置  $k=0$ 。

11) 首先计算  $f_i(\mathbf{A}^k), i=1,2,\dots,n$ , 计算目标函数  $\varepsilon(\mathbf{A}^k)$ ; 计算雅可比矩阵  $\mathbf{J}_k$ , 然后计算  $\mathbf{J}_k^T$  以及  $\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k$ 。

12) 计算迭代增量  $\Delta = -(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \mu_k \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}_k^T \varepsilon(\mathbf{A}^k)$ 。

13) 更新解向量:  $\mathbf{A}^{k+1} = \mathbf{A}^k + \Delta$ 。并且计算  $f_i(\mathbf{A}^{k+1}), i=1,2,\dots,n$ , 获得更新后的解向量的目标函数值  $\varepsilon(\mathbf{A}^{k+1})$ ; 计算雅可比矩阵  $\mathbf{J}_{k+1}$ , 然后计算  $\mathbf{J}_{k+1}^T$  以及  $\mathbf{J}_{k+1}^T \mathbf{J}_{k+1}$ 。

14) 根据收敛准则判断是否满足停止搜索的条件。若满足,终止计算,输出  $\mathbf{A}^{k+1}$  和  $\varepsilon(\mathbf{A}^{k+1})$ , 跳转至步17)。若不满足,继续执行下一步。

15) 判断  $\varepsilon^{k+1} < \varepsilon^k$  是否满足。若满足,则令  $\mu^{k+1} = \beta_1 \mu^k$ ; 不满足,则令  $\mu^{k+1} = \beta_2 \mu^k$ 。

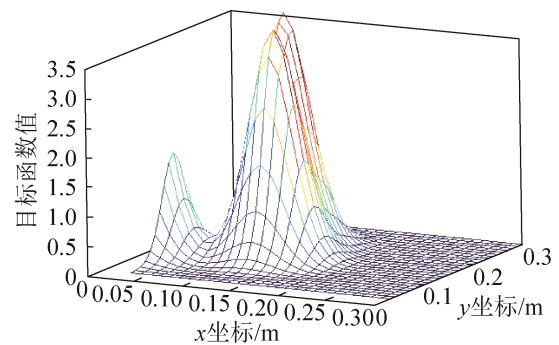
16) 置  $k=k+1$ , 转步12)。

17)  $m$  递增1。判断  $m$  值是否小于或者等于蜂群算法确定的种子总数。若满足,则跳转至步10); 若不满足,将多个搜索结果代入目标优化函数求出其函数值,其中目标值函数最小的搜索结果,即为跟踪方程组的最优解。

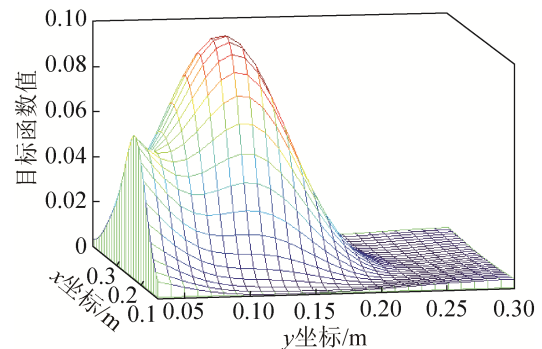
### 3 算法仿真验证及跟踪实验

#### 3.1 跟踪模型目标函数仿真分析

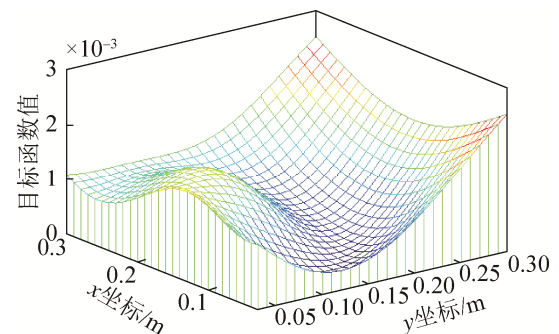
为验证跟踪模型目标函数的多峰性,由程序任意选取坐标值(0.15, 0.08, 0.25), 获得了对应的目标函数。并选取了  $z$  坐标值分别为 0.08 m, 0.15 m, 0.25 m 时的3个搜索平面进行分析,得到  $xoy$  平面的不同坐标值与目标函数的三维图,如图3所示。



(a)  $z=0.08$  m



(b)  $z=0.15$  m



(c)  $z=0.25$  m

图3 目标函数三维图

Fig. 3 Three dimensional graph of objective function

由图3(a)~(c)可知:当搜索平面距最优解平面

越远, 目标函数值与最优解偏差越大, 但在每个搜索平面上均存在诸多的局部极小值, 并且全局最优点的周围被目标函数值较差的点包围。如图 3(a)和(b)所示, 当  $x$  坐标大于  $0.2\text{ m}$  的区域内, 目标函数值都接近于最优值。因此若搜索策略选取不当, 易导致搜索陷入局部极值点。

### 3.2 算法仿真实验与对比分析

为验证改进后蜂群 L-M 算法的准确性和快速性, 采用 C 语言编程软件编写了算法程序, 完成了算法仿真实验。具体步骤如下: 先给定一组坐标值  $(x_0, y_0, z_0)$  代入方程组(11), 顺解 4 个方程得到  $(c_1, c_2, c_3, c_4)$ ; 然后将  $(c_1, c_2, c_3, c_4)$  的值再代入目标函数(12), 此时将 3 个坐标值作为未知量, 分别采用 Powell 优化算法、标准蜂群算法、排序选择的混沌蜂群 L-M 算法进行寻优, 寻优结果记为  $(x_1, y_1, z_1)$ 。则  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分量的算法误差  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  分别为:

$$\Delta x = |x_1 - x_0| \quad (21)$$

$$\Delta y = |y_1 - y_0| \quad (22)$$

$$\Delta z = |z_1 - z_0| \quad (23)$$

随机选取 100 个空间坐标值进行仿真计算。标准蜂群算法、排序选择的混沌蜂群 L-M 算法的基本参数设置如下: 引领蜂和跟随蜂的数量均为 20, 算法最大迭代次数为 2 000, 误差容许值为  $10^{-4}$ 。Powell 优化算法的误差容许值设置为  $10^{-4}$ , 最大迭代次数设置为 2 000。3 种算法的性能对照如表 1 所示。

表 1 3 种算法的性能对比

Tab. 1 Performance comparison among the three algorithms

算法类型	平均迭代次数	收敛率/%
Powell 优化算法	1 836	23
标准人工蜂群算法	692	77
排序选择的混沌蜂群 L-M 算法	215	100

由表 1 可知: Powell 优化算法对跟踪非线性方程组的计算成功率较低, 计算精度的提高依赖于初值的选择和迭代次数的设置。该算法要达到较好的

精度需要的平均计算时间达到约 3 min, 最长的可达 10 余分钟, 并且它不能保证每次迭代求出的解都是全局最优解, 具有初始点敏感、收敛速度慢、局部收敛等局限性。

而标准的蜂群算法, 收敛成功率高于 Powell 优化算法, 但在求解某些坐标位置时, 即使迭代次数达到 2 000 次, 也无法达到设定精度。改进后的蜂群算法不受目标函数多峰性的影响, 能在较少的迭代次数收敛到所需精度。随机选取一组坐标值, 采用标准蜂群算法、排序选择的混沌蜂群 L-M 算法分别求解跟踪目标函数, 算法的进化曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出, 排序选择的混沌蜂群 L-M 算法明显优于标准蜂群算法。

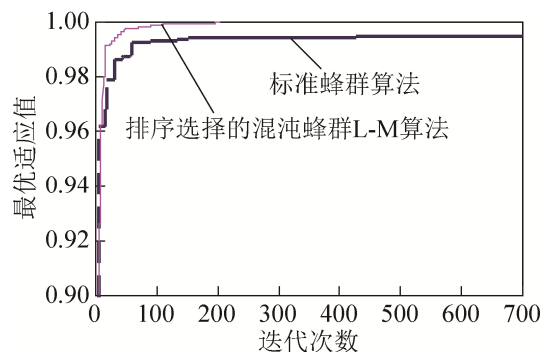


图 4 算法求解的仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of two algorithms

通过算法仿真实验进行统计分析, 改进后的蜂群算法的  $x$  分量、 $y$  分量、 $z$  分量平均误差依次为  $0.002\ 2\text{ m}$ 、 $0.001\ 9\text{ m}$ 、 $0.002\ 0\text{ m}$ 。 $x$  分量、 $y$  分量、 $z$  分量位置误差的标准偏差依次为  $0.00\ 012\text{ m}$ 、 $0.000\ 084\text{ m}$ 、 $0.000\ 078\text{ m}$ 。

算法仿真实验说明: 排序选择的混沌蜂群 L-M 算法在求解多变量、多局部极值的方位跟踪非线性优化问题中取得了较好的收敛精度, 完全不依赖求解初值的选取, 能快速准确地求解出 3 个位置跟踪参数。

## 4 结论

为实现胃肠道遥控给药胶囊的快速跟踪, 提出了倾角传感式磁矢量检测法, 设计开发了跟踪装置



的原理样机。该方法减少了待求未知量个数,减少了磁场发生装置中励磁源的个数,由此减小每轮跟踪的采样数据量和采样时间。在进行磁场逆问题的求解中,由于目标函数的多峰性,且全局最优点周围被坏点包围,极易出现早熟、收敛慢、收敛停滞等现象,因此研究了排序选择的混沌蜂群 L-M 算法,一方面,引入混沌序列方式改进了算法初始解的生成;另一方面,采用了排序式选择策略,使坏点在算法早期也能有较大的概率被选中,避免过早陷入局部极值;此外,将蜂群算法与 L-M 算法相结合。

为验证排序选择的混沌蜂群 L-M 算法求解跟踪问题的可行性和精度,进行了算法仿真实验。并采用 Powell 优化算法、标准蜂群算法与其进行了算法性能对比。实验表明:改进后的蜂群算法不依赖于初值的选取、收敛成功率达到 100%,在更少的迭代次数达到了更高的收敛精度。跟踪模型和求解算法的研究,为给药胶囊快速跟踪的实用化技术提供理论基础和实验依据。

### 参考文献:

- [1] Singeap A M, Stanciu C, Trifan A. Capsule endoscopy: The road ahead[J]. *World Journal of Gastroenterology* (S1007-9327), 2016, 22(1): 369-378.
- [2] Lin L, Rasouli M, Kencana A P, et al. Capsule endoscopy — A mechatronics perspective[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering* (S2095-0233), 2011, 6(1): 33-39.
- [3] 杨闯, 陈扬枝. 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.
- [4] Yang Chuang, Chen Yangzhi. Research on medicine trigger control way of gastrointestinal drug site-specific release capsule[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2013, 42(1): 37-40.
- [5] Beccani M, Aiello G, Gkotsis N, et al. Component based design of a drug delivery capsule robot[J]. *Sensors & Actuators A: Physical* (S0924-4247), 2016, 245(7): 180-188.
- [6] 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.
- [7] Karargyris A, Koulaouzidis A. OdoCapsule: next-generation wireless capsule endoscopy with accurate lesion localization and video stabilization capabilities[J]. *IEEE transactions on biomedical engineering* (S0018-9294), 2014, 62(1): 352-360.
- [8] Nafchi A R, Goh S T, Zekavat S A R. Circular Arrays and Inertial Measurement Unit for DOA/TOA/TDOA-Based Endoscopy Capsule Localization: Performance and Complexity Investigation[J]. *IEEE Sensors Journal* (S1530-437X), 2014, 14(11): 3791-3799.
- [9] Guo Xudong, Song Chengli, Yan Rongguo. Optimization of multilayer cylindrical coils in a wireless localization system to track a capsule-shaped micro-device[J]. *Measurement* (S0263-2241). 2013, 46(1): 117-124.
- [10] J M D Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*[M]. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2010: 56-60.
- [11] Dervis Karaboga, Bahriye Akay. A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm[J]. *Applied Mathematics and Computation* (S0096-3003), 2009, 214(1): 108-132.