

一种微型管道机器人移动机构的设计

王小龙, 马骏骑, 杨尚平, 杨启敏
(昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 论述了微型管道机器人移动机构的发展背景, 在介绍了已有的微型管道机器人移动机构的基础上, 指出了这种移动机构的缺陷. 然后设计了一种新型微型管道机器人的移动机构, 并给出了其运动机理及电磁铁的主要参数计算公式. 这种新型微型管道机器人的移动机构以电磁驱动, 可实现在微型管内的双向蠕动运行, 并能够较顺畅的随弯管形状被动转向.

关键词: 管道机器人; 蠕动; 电磁驱动

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)03-00046-04

New Walking Mechanism of Micro In - Pipe Robot

WANG Xiao-bng, MA Jun-qi, YANG Shang-ping, YANG Qim in

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The background of walking mechanism of micro in - pipe robot is firstly demonstrated in this paper. Through the introduction of existing walking mechanism, some defects are pointed out. Then, a new walking mechanism is designed, and the movement principle and the formulae for major parameters of electromagnet are offered. The new mechanism, which is actuated by electromagnetic power, can wriggle in a small pipe in two directions, and walk in a bent pipe smoothly and easily.

Key words: pipe robot; wriggling; electromagnetic actuation

0 引言

在核工业、石油化工业等领域, 管道作为一种有效的输送装置而得到广泛的应用. 但是, 大量的管道, 尤其是小口径管道 (管道直径小于 80 mm 的细管) 在使用一段时间后, 难免会出现裂纹、穿孔等损伤. 因此, 管道机器人作为一种管道的故障诊断、检测及维修的可行性工具应运而生, 并越来越受到重视.

移动机构是微型管道机器人重点研发的领域之一, 现阶段国内外微型管道机器人移动机构的驱动方式可分为压电驱动、静电驱动、电磁驱动、气压驱动、形状记忆合金 (SMA) 驱动、热膨胀驱动、光驱动及超声波驱动等^[1]. 而机器人的行走方式又可分为惯性冲击行走、蠕动爬行、弹性针型振动行走及轮式行走等^[2].

各种行走方式有各自的优越性和局限性. 其中蠕动爬行方式负载能力强, 动作可靠且易于微型化; 但不易实现且运动速率较慢. 现有的蠕动式微型机器人, 大多采用气压驱动 (如上海大学根据蚯蚓蠕动原理研制的蠕动式管内机器人^[3])、形状记忆合金驱动 (如上海交通大学研制的仿蚯蚓柔性蠕动机器人^[4])、储氢合金驱动^[5]等驱动方式. 其中气压驱动结构复杂, 不易微型化; 形状记忆合金驱动和储氢合金驱动, 由于均需要对执行器进行反复加热和散热, 以实现驱动单元的膨胀与收缩, 但在微小管道环境下, 驱动单元的散热会变得十分困难.

鉴于电磁驱动方式结构简单、工作可靠、响应速度快, 且发热量较小、易于小型化的特性, 本文认为电磁驱动方式与蠕动行走方式相配合, 是较为合理的设计方案.

1 已有设计方案的介绍^[6]

现有的一种电磁驱动蠕动式管内机器人的移动机构如图 1 所示. 其主要部分为: 衔铁 m_1 , 螺管式电磁

收稿日期: 2005-01-11.

第一作者简介: 王小龙 (1977~), 男, 在读硕士. 主要研究方向: 工业机器人. E-mail: wxl_26@126.com

铁本体 m_2 , 前后两组支腿, 以及位于 m_1 和 m_2 之间的螺旋弹簧。

机器人的运动机理可分为三个步骤, 如图 2 所示。机器人的运动是这三个步骤不断循环动作的结果。

1) 在初始状态时, 电磁铁失电, 弹簧处于自由状态, 故 m_1 与 m_2 分离, 如图 2a;

2) 当电磁铁通电时, m_1 与 m_2 吸合。由于安装在 m_1 与 m_2 上的支腿与管壁呈一定的倾角, 故支腿在正向 (即图 2 中左向) 受到的摩擦力远小于在逆向 (即图 2 中右向) 受到的摩擦力, 实现单向自锁, 所以当 m_1 与 m_2 吸合时, m_1 不动, 而 m_2 向左移动了一段距离, 如图 2b;

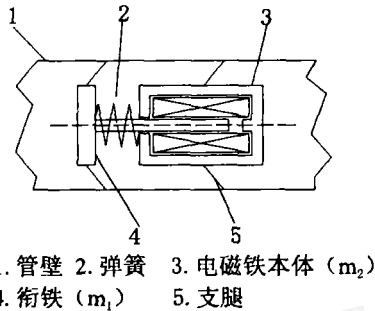


图1 已有方案的行走机构
Fig.1 Existing walking mechanism

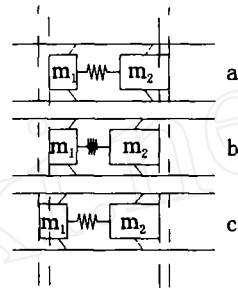


图2 已有方案的运动机理
Fig.2 The movement principle of existing mechanism

3) 再断开电源, 电磁力作用消失, 由于支腿的作用, m_2 不动, 而 m_1 在弹簧力的作用下向左移动了一段距离。这时机器人回到初始状态, 且整个机构向左前进一步。

2 改进型电磁蠕动微型机器人的结构设计及其运动机理

以上介绍的管道机器人移动机构具有结构简单、单位行程较长、动作灵敏、控制方便等特点; 但同时, 这种结构也存在以下三个固有的缺陷:

1) 不能双向运动。由于机器人支腿的单向自锁性, 因此机器人只能单向运动;

2) 转弯困难。由于机器人以一组电磁铁为主要结构, 而且机器人在运动时, 支腿始终与管壁接触, 因此, 当遇到半径较小的弯曲管道时, 机器人的运动将会比较困难, 甚至有卡死的可能;

3) 出现紧急情况时撤出困难。当机器人出现故障或管道阻塞时, 由于支腿的单向自锁性, 故要想将其退出工作管道将十分困难。

鉴于上述管道机器人移动机构的缺点, 本文所提出的机器人的改进方案如图 3a 所示, 其移动机构由三组电磁铁及其之间的柔性关节组成, 可以看作是由两个柔性关节连接的三个环节所组成, 每个环节的结构与图 1 相似, 但支腿改为弹性支撑。其中柔性关节为万向轴结构, 可实现管道内的自由偏转。弹性支撑为有一定韧性的橡胶棒, 其两端分别与衔铁和电磁铁本体铰接, 每个环节上有六个均匀分布的弹性支撑。为描述方便起见, 机器人的结构可简化表示为图 3b 所示。其中标有阿拉伯数字 1、2、3 的椭圆型图案分别代表机器人的第一、二、三环节, 其中椭圆长轴水平状态代表该环节上的电磁铁处于失电状态 (如图 3b 中第一环节), 而椭圆长轴垂直状态则代表该环节上的电磁铁处于通电状态 (如图 3b 中第二、三环节)。

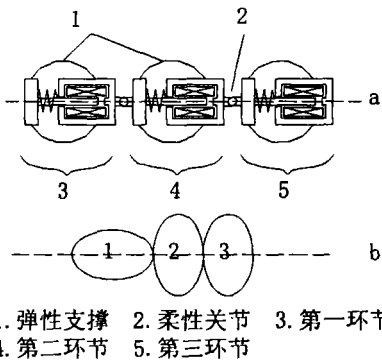
机器人的运动由电磁力驱动, 其直管中的运动机理如图 2 所示。可分为四个步骤, 机器人的直线运动是这四个步骤不断循环动作的结果:

1) 在初始状态下, 第一环节上的线圈失电, 而第二、三环节上的线圈通电。此时, 第一环节上的弹性支撑趋向伸直而与管道分离; 而第二、三环节上的弹性支撑则趋向弯曲而与管道压紧, 如图 4a;

2) 将第一环节上的线圈通电, 同时第二环节上的线圈失电, 而第三环节上的线圈保持通电, 则第一环节向左移动了一段距离, 如图 4b;

3) 第二环节上的线圈通电, 同时第三环节上的线圈失电, 而第一环节上的线圈保持通电, 此时第二环节向左移动了一段距离, 如图 4c;

4) 第一环节上的线圈失电, 同时第三环节上的线圈通电, 而第二环节上的线圈保持通电, 则第三环节向左移动了一段距离, 如图 4d



1. 弹性支撑 2. 柔性关节 3. 第一环节
4. 第二环节 5. 第三环节

图3 设计方案的结构示意图
Fig.3 The designed walking mechanism

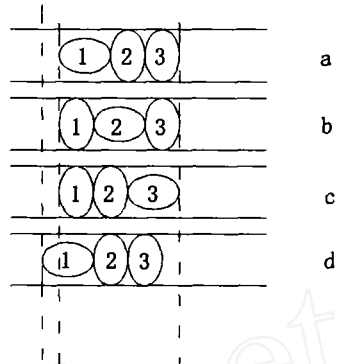


图4 设计方案在直管中的运动机理
Fig.4 The movement principle of the designed mechanism

至此,整个机构向左移动了一步,并且恢复到了初始的状态.机器人通过对以上的四个步骤的不断循环,即可实现蠕动爬行;如果要使其反向运动,则只需改变三组线圈的通断电顺序即可实现.

由于机器人的三个环节之间采用柔性关节连接,因此可实现在弯管中运行,同时还可以通过改变线圈的通断电模式来改善其通行能力,如图 5 所示.

综上所述,由于采用了弧形弹性支撑和柔性关节,这种管道机器人不仅可在直管中双向运动,还可以较为顺畅地通过弯管.而且当机器人出现故障或管道前端阻塞时,只需切断所有电源,机器人的弹性支撑即可与管壁分离,将其退出也极易实现.

3 电磁铁各项参数的计算公式^[7]

由于吸入式电磁铁(螺管式电磁铁)漏磁通也能够产生使衔铁吸和的电磁力,因此可用电磁力较大,故本文所设计的机器人以平面止座吸入式电磁铁作为驱动单元.以下将给出电磁铁计算的四个基本方程,用以计算电磁铁的各项参数(由于设计时只要求定性计算,而不需要精确计算,故以下方程均为简略计算方程).

1) 驱动力方程

驱动力方程用于决定电磁铁的尺寸参数,是电磁机构设计中最关键的方程.在定性计算中,可忽略导磁体的磁阻和非工作气隙的影响,其驱动力 F_m 方程由下式给出:

$$F_m = -\frac{1}{2} \left[U^2 \frac{d}{d} - (N)^2 \left(\frac{z}{h_{xq}} \right)^2 \right]$$

式中: N —激励线圈的磁势(A), $\frac{1}{\mu}$ —比磁导(H/m), z —衔铁伸入线圈的长度(m), h_{xq} —线圈高度(m), U —工作气隙的磁压降(A), $\frac{1}{\mu}$ —气隙磁导(H), $\frac{1}{\mu}$ —气隙长度(m), d —衔铁直径(m).

上式经简化和近似后得到(为方便计算,取衔铁与线圈直径之比,一般取值范围为平均值的 0.55):

$$F_m = 0.31B^2 d^2 \frac{d^2 + 2.5^2}{(d + 0.74)^2} \times 10^6 \quad (1)$$

式中: B —气隙磁感应强度(T).

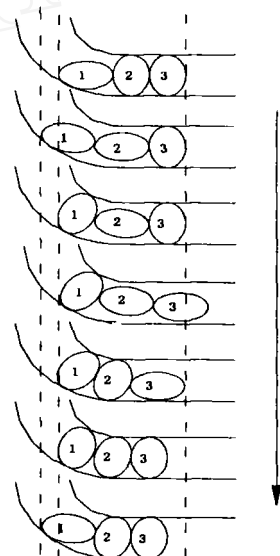


图5 设计方案在弯管中的运动机理
Fig.5 The movement principle in a bent pipe

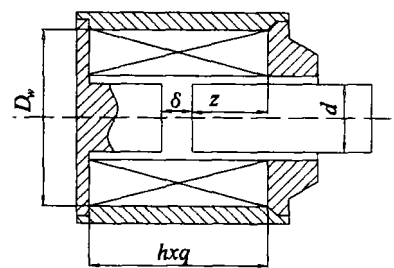


图6 电磁铁结构
Fig.6 The electromagnet structure

由 (1) 式可见, 根据设计的要求确定 F_m 和之后, 再选定 B 就可以求出衔铁的直径及截面积。

2) 磁路方程

建立磁路方程用于计算电磁铁工作的激磁磁势, 从而计算出激磁线圈的安匝数。根据漏磁系数法计算的磁路方程由 (2) 式给出:

$$N = \sum \phi R + \sum H_i L_i \quad (2)$$

式中: R — 气隙的磁阻, 为气隙磁导的倒数, $\sum \phi R$ — 气隙上的总磁压降, $\sum H_i L_i$ — 导磁体中的总磁压降。

在一般情况下, (2) 式可简化为:

$$N = 1.25 \phi R = 1.25 B S = B \frac{d}{d + 0.74} \times 10^6 \quad (3)$$

式中: B — 气隙的磁感应强度 (T), S — 衔铁截面 (m^2)。

3) 电压方程

因为机器人是由电磁铁驱动, 电磁铁必须接入一定电压的电源才能工作, 因此, 建立电压方程是机器人设计的必要环节。本文设计的机器人的电压方程由 (4) 式给出:

$$U = IR_{xq} = N \frac{(D_w + d)}{2q_x} \quad (4)$$

式中: D_w — 线圈的直径 (m), ρ_x — 线圈相应温度下的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$), q_x — 导线的截面积 (m^2)。

4) 发热方程

由于机器人是在微小管道内作业, 作业空间狭小, 因此, 发热问题也是不可忽略的一个方面。根据上述方程所确定的电磁铁的各项参数, 必须能够保证电磁铁的温升不致超过机器人的最大容许温度。发热方程由 (5) 式给出:

$$\Delta T = (N)^2 \frac{P}{K_r f_i (D_w - d) h_{xq}^2} \quad (5)$$

式中: P — 接通时间百分比 (由图 4 可见, 电磁铁的接通时间占每一循环的 2/3, 故 P 取 2/3), h_{xq} — 线圈的高度 (m), f_i — 线圈的填充系数, K_r — 线圈外表面的散热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

从 (5) 式可以看出, 在确定了 N 和 d 之后, 该式可用于校验电磁铁的温升, 并随之确定线圈的高度 h_{xq} 和厚度 b_{xq} 。

4 结束语

本文所设计的机器人采用蠕动行走和电磁力驱动相配合的设计方案, 能够实现在微小管内双向行走和随管道形状被动转向; 而且当机器人出现故障或管道前端阻塞时, 只需切断电磁铁电源, 机器人的弹性支撑即可与管壁分离, 将其退出也极易实现。本文所提出的设计方案的讨论仅限于理论和原理范畴, 并未涉及机器人的具体实用结构和试验验证; 在付诸实施时涉及到的诸多具体问题, 还有待于在今后的工作中进一步试验研究。

参考文献:

- [1] 杨志欣, 孙宝元, 董维杰, 等. 微机器人关键技术及应用 [J]. 机床与液压, 2002, (6): 3 ~ 6
- [2] 孙立宁, 刘品宽, 吴善强, 等. 管内移动微型机器人研究与发展现状 [J]. 光学精密工程, 2003, 11 (4): 326 ~ 331.
- [3] 米智楠, 龚振邦, 钱晋武, 等. 一种无损检测的新型机器人 [J]. 无损检测, 2000, 22 (11): 489 ~ 491.
- [4] 马建勋, 李明东, 包志军, 等. 仿蚯蚓蠕动微机器人及控制策略 [J]. 上海大学学报, 1999, 33 (7): 855 ~ 861.
- [5] FUKUDA H, HOSOKA IH, UEMURA M. Rubber gas actuator driven by hydrogen storage alloy for inspection mobile robot with flexible structure [J]. IEEE (国际电器与电子工程师学会) [C], 1989. 1847 ~ 1852
- [6] 孙麟治, 孙萍, 秦新捷, 等. 细小管道内爬行的微型机器人 [J]. 光学精密工程, 1998, 6 (5): 57 ~ 63.
- [7] 张冠生, 陆俭国. 电磁铁与自动电磁元件 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 35 ~ 85.