

细小管道内爬行的微机器人*

孙麟治 孙萍 秦新捷 王存敏

(上海大学精密机械工程系 上海 201800)

摘要 基于现代精密加工技术制造的微机械,有着广阔的应用前景。特别是直径 $\Phi 10\sim 20\text{mm}$ (1英寸)的细小管道,要求研制新型微机器人用于无损检查管壁和维修。考虑到电磁驱动器,具有结构简单、单位行程长、动作灵敏、控制方便等优点,研制了一种电磁式微机器人,外形尺寸 $\Phi 15\times 30\text{mm}$,自重25g,它可以在 $\Phi 20\text{mm}$ 金属管内爬行,移动速度 $6\sim 8\text{mm/s}$,有垂直爬坡能力。所加电压 $16\sim 20\text{V}$,频率 $30\sim 70\text{Hz}$ 。

关键词 微机械 机器人 管道

1 前 言

发电、化工、制冷等行业的热交换器,存在着直径大小不等的细小管道,长期使用后的腐蚀或机械损伤,会引起裂缝,酿成严重的事故。特别是核电站的热交换器,长年累月形成的积垢,会腐蚀管壁,是核泄漏的一隐患。积垢腐蚀和裂缝损伤的自动检测及除垢作业急待解决。统计国内外这类热交换器的管径,大致在 $20\sim 30\text{mm}$ 之间,针对这种细小工业管道检测作业的研究,成为人们关注的一个热点,但因其管径太小,不可能用常规的机构、元器件和加工方法制作,而要用密集集成度方面比过去高得多的元器件,针对微小型特点的制作方法去实现,这种技术在日本称为“微机械”(Micro Machine)。

近年来,由于微机械的出现,人们一致认为,这种基于IC工艺和精密加工工艺发展起来的新技术,具有尺寸小、集成度高、功能独特等特点,潜在应用价值较大,也为细小管道微机械的开发铺平了道路,引起世界各国重视。

对于管道用的自动监测器,我国哈工大和交大曾进行过 $\Phi 250\text{mm}$ 以上大口径煤气、石油管道用检测机器人研究获得成效,他们的研究,无论是采用轮式的,还是气压蠕动的、电磁蠕动的,机构与控制上的设计各有不同巧妙之处,但均无法在细小管内直接引用。

对于这类细小管道微机械的研究,以日本最为活跃和富有代表性。日本早在1991年开始

* 本研究项目得到863国家高技术计划资助

实施一项微机械研究计划,投资250亿日元。预期在十年内开发三大类多种微机械服务于人类,其中就有一种是针对细小口径管道的遥控探测器正在研制中。东就工业大学正在进行螺旋式机械传动的导管式微机械^[1],移动速度快,但结构比较复杂。Denso 公司研制的压电元件驱动的管道微机械^[2,3],结构比较简单,自治水平比导管型要高,但移动速度不快,搭载能力也不大。

我们注意到电磁驱动器具有结构简单,单位行程长、动作灵敏、控制方便等优点,进行了电磁式微机械(或称微机器人)研究。本文介绍其结构设计和运行特性试验的结果。

2 结构设计和动作原理

电磁式细小管道微机械的结构如图1所示,结构参数见表1。

Table 1 Design parameter

| imes | | A |
|------------------------|-----|------------|
| mass m_1 | g | 5 |
| mass m_2 | g | 19.5 |
| turns of coil | N | 2700 |
| spring constant | k | 0.94kgf/cm |
| applied voltage | V | 14 |
| dimension $D \times L$ | mm | 15 × 30 |
| weight | g | 25 |

其主要部分为:与芯柱衔铁相边的配重块 m_1 ,电磁铁本体 m_2 ,前后两组支撑脚,以及位于 m_1 和 m_2 之间的螺旋弹簧。支撑脚均匀分布的外缘,并与管壁呈一定斜角 θ 布置。电磁铁受激振动时,由于电磁吸引力与弹簧力的相互作用,产生往复变形并借助支撑脚与管壁的摩擦,促使微机械沿着管壁爬行。

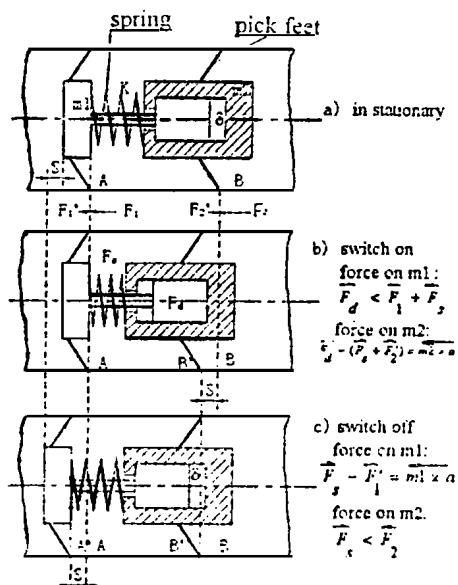


Fig 1 Principle of movement

机器人的移动机理如图1所示。起初,电磁线圈失电时(图1a),电磁吸力 F_d 为0,而弹簧张力 F_s 足够大,而使二质量块分离,左右支撑脚各自静止在A点和B点,两点间的距离为最大,机器人静止不动。

当对电磁铁通电时,磁铁吸力 F_d 作用于体内的柱芯衔铁,并且 F_d 大于弹簧力 F_s ,使衔铁向内移动,弹簧受压。同时右端支撑脚驱动质量块 m_2 从图B移动到B(图1b)。这是因为支撑脚的摩擦阻力 F ,相对 F_1 以及 F_2 相对 F_2 的作用方向相反,这意味着反向摩擦阻力 F 小于顺向摩擦阻力 F 同时 $F_2 < F_2$,因此左支撑脚静止不动。

然后,断开电源,作用于衔铁上的电磁吸力迅速下降,弹簧变形能得到释放,弹簧力 F_s 克服摩擦阴力 F_1 而使左端从A点移到A点。这是因为作用于右脚上的力 F_2 大于作用于左端的力 F_1 因此最终机器人向左端移动了一步(图1c)。

重复上述过程,就能使机器人一步一步地前移。一般我们通过拖带电线对电磁式机器人施加正弦电流,并以改变频率的办法,改变移动到速度。

3 计算分析

1). 振动系统的固有角频率 ω 和频率 f

两质量块单自由度系统的固有角频率 ω 和频率 f 由以下公式给出:

$$\omega = \sqrt{\frac{K(m_1 + m_2)}{m_1 \times m_2}} = 434.7 \text{ rad/s}$$

此处: 质量 $m_1 = \frac{W_1}{g} = \frac{0.005}{980} \text{ (kg} \cdot \text{s}^2/\text{cm)}$

质量 $m_2 = \frac{W_2}{g} = \frac{0.0195}{980} \text{ (kg} \cdot \text{s}^2/\text{cm)}$

弹簧常数 $k = F_s/\lambda = 0.94 \text{ kgf/cm}$

固有频率 $f = \omega/2\pi = 69 \text{ Hz}$

很明显,增加弹簧常数 k ,将会提高固有角频率 ω 和频率 f 。

2) 电磁吸力 F_d

根据电磁原理,磁场中作用于磁体的吸力 F_d 可由公式(1)来表达:

$$F_d = F_{d\delta} + F_{d\sigma} = - \frac{1}{2} [U_{\delta}^2 \frac{dG_{\delta}}{d\delta} - (NI)^2 g \left(\frac{I_a}{I_k}\right)^2] \quad (1)$$

它包括两部分,前者是在工作气隙 δ 中的主磁通 Φ_{δ} 产生的表面吸引力,后者是泄漏磁通 Φ_{σ} 与绕组电流之间的相互作用所产生的电动力。由于 $F_{d\delta}$ 远大于 $F_{d\sigma}$ 因此 F_d 可由公式(2)来计算:

$$F_d \approx F_{d\delta} = - \frac{1}{2} U_{\delta}^2 \frac{dG_{\delta}}{d\delta} \text{ (N)} \quad (2)$$

此处: $G_{\delta} = \text{磁导率} = \mu_0 \frac{S}{\delta} = \frac{\mu_0 \pi d^2}{4\delta} \text{ (H)}$

$$\frac{dG_{\delta}}{d\delta} = - \mu_0 \frac{\pi d^2}{4\delta^2}$$

$$U_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta}}$$

S —— 底面积;

d —— 衔铁的直径 (m);

μ_0 —— 真空导磁率, $1.25 \times 10^{-6} \text{ (H/m)}$;

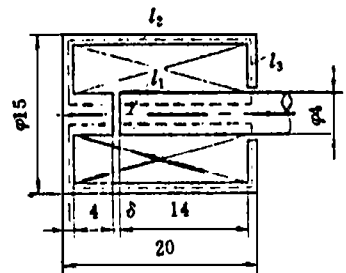
δ —— 工作气隙 (m);

U_{δ} —— 磁降;

Φ_{δ} —— 磁通量;

首先,我们用公式(3)来估计工作气隙内的磁通量

$$\Phi_{\delta} = \frac{NI}{R_{\delta}} \times K_{\delta}$$



(3) Fig. 2 Scheme diagram

此处 $(IW) = \text{线圈中的磁动力} = \text{线圈直流} \times \text{线圈匝数} = 0.06 \times 2700 = 162 (\text{A})$

$R = \text{阻值}$

$$R = 1/G_{\delta}$$

$K_{\delta} = \text{影响系数} = 0.9$

因此对于这种结构类型(图2)

假定间隙 $\delta = 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8 \text{mm}$, 代入公式(3), 我们分别得到不同的磁通量 $dG_{\delta}/d\delta, \Phi_{\delta}^*$ 见表2

Table 2 Calculation of attraction force F_d

| δ | (mm) | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.8 |
|--|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| $G_{\delta} \times 10^{-8}$ | (H) | 31.2 | 15.6 | 7.8 | 5.2 | 3.12 | 1.95 |
| $\frac{dG_{\delta}}{d\delta} \times 10^{-4}$ | (H/m) | -62.4 | -15.6 | -3.9 | -1.73 | -0.62 | -0.25 |
| $\Phi_{\delta}^* \times 10^{-8}$ | (Wb) | 4550 | 2274 | 1173 | 758 | 454 | 283 |
| $\Phi_{\delta} \times 10^{-8}$ | (Wb) | 2100 | 1950 | 1200 | 765 | 485 | 310 |
| F_d | (gf) | 1428 | 1224 | 470 | 190 | 76 | 32 |

根据克希荷夫第二定律, 并以能量守恒定律为基础, 线圈的磁动力可表示为下式:

$$IW = U = \Phi R = \Phi_{\delta}/G_{\delta} + H_i \cdot L_j \quad (4)$$

此处 G_{δ} ——第 i 个间隙的磁导率(H)

H_j ——第 j 个磁体的磁场强度(A/m)

L_j ——第 j 个磁体的长度(m)

由于表面 S_j 的磁感应强度: $B_j = \Phi_{\delta}/S_j$ (T)

我们从软磁材料 F1 的磁曲线中找到合适的 H_j , 以得到第 j 个磁铁本体的磁降。由此, 在 Φ_{δ}^* 的估计值及通过近似方法得到的合适的 (IW) 基础上, 得到不同的磁通量 Φ_{δ} , 最后将其代入公式(2)得到电磁力 F_d (表2)。它表明随着间隙的增大, 吸引力 F_d 迅速减小, 如图3所示。与此同时, 图中曲线 F_s 表示了弹簧力将随压缩量 λ 的增加而增大。由此可见, 电磁间隙 δ 不得大于 0.3mm。

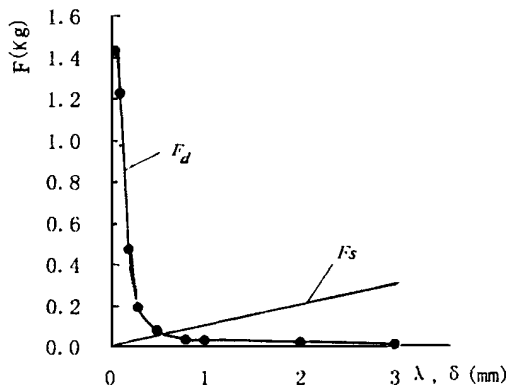


Fig 3 F_d and spring force F_s vs λ, δ

4 模型性能实验

实验模型的机械结构参考见表1, 这是针对热交换器管道而设计的。试验时为便于观察起见, 改为 $\Phi 20.5 \text{mm}$ 内径的玻璃管代替 $\Phi 22 \text{A} 800$ 型合金管, 玻璃管内壁的粗糙度稍比合金管光

滑。

首先测定了电磁线圈的静态吸引力 F_{d0} , 结果见表3

Table 3 Magnetic attraction force

| voltage V_{dc} | | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
|------------------|-----|-----|------|------|------|------|
| F_{d0} | g f | 830 | 1060 | 1330 | 1590 | 1780 |
| current | mA | 34 | 68 | 103 | 135 | 171 |

电磁铁的工作气隙采用 $\delta = 0.19\text{mm}$, 此处 $F_d > F_s$ 。

试验时, 用 XD7 型低频信号发生器直接对电磁线圈施加 14~20V 交流电压, 但线圈的工作电流受到信号发生器的输出限制, 不能超越限定值, 此时测定了实验模型在水平方向内和在垂直方向内的移动速度, 结果见表4和图4曲线。

Table 4 Moving speed of prototype

| frequency Hz | horizontal movement | | | | | vertical movement | | | | |
|--------------|---------------------|------|------|------|-----|-------------------|------|------|------|------|
| | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| voltage V | 14 | 16 | 16.5 | 17.5 | 20 | 12.5 | 13.5 | 17 | 18.5 | 21 |
| current mA | 63 | 58 | 50 | 50 | 55 | 48 | 50 | 50 | 5.5 | 60 |
| power VA | 0.88 | 0.93 | 0.83 | 0.88 | 1.1 | 0.6 | 0.68 | 0.85 | 1.02 | 1.26 |
| speed mm/s | 5.3 | 6.3 | 7.1 | 7.4 | 8.4 | 4.1 | 4.8 | 5.5 | 6.2 | 6.6 |

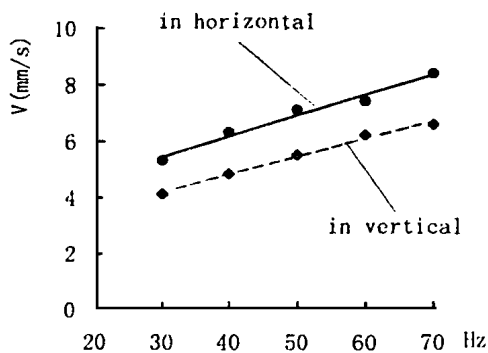


Fig 4 Moving speed in relation to frequency

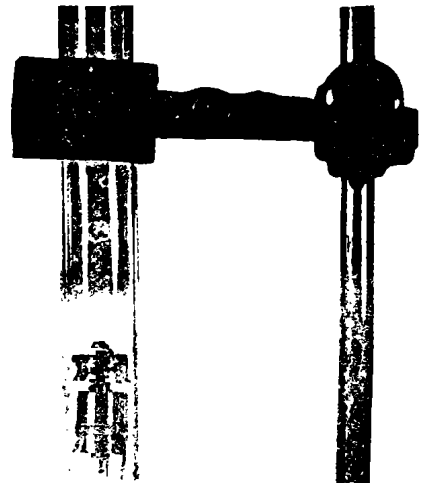


Fig 5 Prototype in small pipe

由此可见, 机器人移动在限定的安匝数 (IN) = 160 条件下, 随着频率的增加而增大, 并且可以认为移动速度与频率之间存在下列关系式:

$$V(\text{移动速度}) = k(\text{常数}) \times \delta(\text{间隙}) \times f(\text{频率})$$

当施加频率由30Hz增大到70Hz时,水平方向的移动速度将由5.3mm/s增大到8.4mm/s

垂直方向的移动速度将由4.1mm/s增大到6.6mm/s(图5)。实验模型的功率为1.2W左右。

试验时主要采用正弦电压,但也曾用方波、三角波电压进行试验,初步结果表明,移动速度有所下降。

实际上支撑脚的斜角 θ 及其对管壁的弹性压力,也影响移动速度和爬行器的搭载能力,有待今后进一步分析研究。

5 结 论

(1) 基于电磁吸力与弹簧力相互作用原理,构成的振动体,配置支撑脚以后,可以作为微机械驱动器,在细小管道内爬行。

(2) 这种新型微小管道机器人具有结构简单、制作容易等特点。

(3) 尺寸为 $\Phi 15 \times 30\text{mm}$ 的微小管道机器人,可用于 $\Phi 20\text{mm}$ 的管道。当施加14~20V交流电压时,机器人在限定的安匝数($I \cdot N$)=160条件下,水平方向管道内的移动速度达到5.3~8.4mm/s,垂直方上的移动速度4.1~6.6mm/s。移动速度随着频率的增加而增大,所需功率小于1.2W。

参 考 文 献

- 1 Hayashi I, et al The running characteristics of a screw principle microbot in a small bent pipe Proc of MHS'95 Nagoya, Japan, 1995: 225~ 228
- 2 Idogaki T. Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine Proc of MHS'95, Nagoya, Japan, 1995: 193~ 198
- 3 Yanagata Y, et al Micro motion mechanism using reaction force by rapid deformation of piezo-electric elements Proc of IFTOMM inter micro machine system, Tokyo, Japan, 1993: 86~ 90
- 4 Mizukami M, et al Miniaturized mobile machine driven by electromagnetic force Proc of IFTOMM inter micro machine system, Tokyo, Japan, 1993: 41~ 45
- 5 Dobroczeni A, et al A special planetary train on frictional type for miniature mechanism. Proc of IFTOMM inter micro machine system, Tokyo, Japan, 1993: 98~ 101
- 6 Hasegawa Y, et al Development of micro mobile machine with wheels Proc of MHS'95, Nagoya, 1995: 219~ 224
- 7 Suzuki Y. Flexible micro-gripper inter J Japan Soc Prec Eng, 1995, 29(1): 10~ 13
- 8 Sun Linzhi, et al The design of Milli-grippers using piezoelectric actuator as well as electro magnetic force Proc of MHS'95, Nagoya, 1995: 199~ 204
- 9 王宝龄. 电磁电器设计基础. 北京: 国防工业出版社, 1989

Mobile Micro-Robot in Small Pipe

SUN Lin-Zhi, SUN Ping, QIN Xin-Jie, WANG Cun-Min

(Dept. of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University Jiaoding, Shanghai 201800)

Abstract

Millimeter size machines based on modern precision machining have potential application in industry. Specially in case of small pipe with diameter smaller than 1 inch, it is required to develop new type micro robot for maintenance or inspection of inside defects. Considering of the advantage of electromagnetic type actuators with simple structure, long stroke, high response and easy control, we do try to develop of a new mobile micro robot in pipe based on interaction of magnetic attraction and spring force. This paper describes the structure and design. The dimension of prototype is $\Phi 15 \times 30$ mm, weight is 25g. It can climb in pipe of $\Phi 20$ mm diameter with speed about 6~8mm/s in horizontal and in vertical under applied voltage 14~20V, 30~70Hz.

Key words: Micro machine, Robot, Pipe

孙麟治 男, 1928年生, 现任上海大学讲座教授, 近年来从事微机械和精密工程研究工作。