

# 一种磁微执行器 Pull-in 模型<sup>\*</sup>

方玉明<sup>1,2</sup> 黄庆安<sup>1,†</sup> 李伟华<sup>1</sup>

(1 东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

(2 南京邮电大学光电工程学院, 南京 210003)

**摘要:** 与静电微执行器类似,磁微执行器中也存在重要的 Pull-in 失稳问题.对于宏观器件,由于磁芯磁阻可以忽略,所以可以利用电磁类比,得到 Pull-in 失稳参数.但对于微观器件,磁芯磁阻不可以忽略,也不可以利用电磁类比.文中首先采用力法对磁微执行器 Pull-in 的失稳现象进行了分析和建模,考虑了微磁芯磁阻,在建立磁微执行器动态小信号模型的基础上,导出了两个 Pull-in 失稳方程.通过求解这两个方程,可以得到 Pull-in 失稳电流和位置两个重要参数.然后又采用能量法研究了同样的 Pull-in 失稳现象,得出了和力法相同的结论.最后,给出了一个分析实例,以反映微磁芯磁阻对 Pull-in 的影响.文中的结论对于磁微执行器的设计具有重要意义.

**关键词:** 磁; 微执行器; Pull-in

EEACC: 2575; 8460

中图分类号: TN402

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)10-1647-05

## 1 引言

MEMS 技术在过去 20 多年里发展迅速,出现了许多微执行器. Pull-in 失稳问题则是静电微执行器和磁微执行器中的主要现象,一直受到各国学者的普遍重视.目前关于静电微执行器 Pull-in 失稳问题的研究非常多<sup>[1~10]</sup>.研究方法可分为两类:一类可称为“力法”<sup>[1~6]</sup>,即研究作用在活动极板上的静电力与弹簧力的合力变化,导出了 Pull-in 失稳条件:当极板间距有一正值的微小扰动时,合力的变化量也为正;另一类是“能量法”<sup>[7~10]</sup>,即系统的总势能(静电势能+机械势能)对极板间距一阶、二阶导数同时为零时, Pull-in 失稳发生.两种方法得出的结果完全一致.力法的优点是能直观地反映物理现象;能量法的优点是具有高度的概括性、统一性,能将力法纳入其中.但能量法的缺点是比较抽象.

相对于静电微执行器,关于磁微执行器的失稳研究论文很少<sup>[11]</sup>.主要原因是,大家普遍认为利用电-磁相似关系<sup>[6]</sup>,可以直接将静电微执行器的 Pull-in 失稳研究结论转化为相应的磁微执行器的结论.但是必须认识到,只有在忽略磁芯磁阻的情况下,电-磁相似关系才可以直接利用.对于宏观磁器件,由于磁芯磁导率远大于磁隙中的空气磁导率,磁芯磁阻相对于磁隙磁阻很小,可以忽略,直接利用电-磁相似关系没有问题.然而,对于磁微执行器件,微

磁芯的磁阻是不可忽略的<sup>[12~15]</sup>.因此,对于磁微执行器的 Pull-in 失稳问题必须做更深入的研究.2005 年, Nemirovsky 等人<sup>[11]</sup>首次利用能量法导出了 Pull-in 失稳条件,但该方法同样很抽象,不易理解.文献检索表明,还未有人采用力法研究过磁微执行器 Pull-in 失稳问题.

本文先采用力法考虑了微磁芯磁阻,利用小信号模型的稳定条件,导出了 Pull-in 失稳条件.然后又采用能量法研究了同样的 Pull-in 失稳现象,得出了和力法相同的结论.本文的结论对于磁微执行器的设计具有重要意义.

## 2 磁微执行器 Pull-in 失稳模型

### 2.1 基于小信号模型的静电微执行器 Pull-in 失稳模型

首先简单回顾一下静电微执行器 Pull-in 失稳模型<sup>[6]</sup>.图 1 所示是常见的平板电容式静电微执行器.该执行器下极板固定,上、下极板间加有电压为  $V = V_0 + v(t)$ ,  $V_0$  是直流偏置电压,  $v(t)$  是小的交流分量,  $v(t) \ll V_0$ .  $g_0$  是电压  $V = 0$  时上、下极板间距.  $x(t)$  是上极板在电压  $V$  作用下的位移;  $x(t) = x_0 + x_1$ ,  $x_0, x_1$  分别是与  $V_0, v(t)$  对应的直流偏置位移、动态小位移,  $x_1 \ll x_0$ . 设上极板质量为  $m$ , 则上极板动力学方程为

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA431010),江苏省高校自然科学基金研究计划(批准号:03KJB510089)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: hqa@seu.edu.cn

2007-01-05 收到, 2007-06-07 定稿

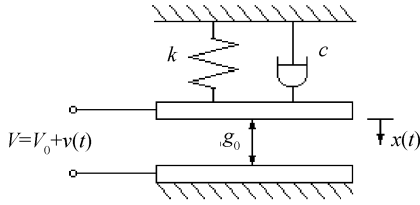


图 1 平板电容式静电微执行器示意图

Fig.1 Schematic diagram of parallel-plate capacitor microactuator

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = \frac{\epsilon_0 A (V_0 + v(t))^2}{2(g_0 - x(t))^2} \quad (1)$$

式中 等号左边三项分别是作用于上极板的惯性力、阻尼力、弹簧回复力,  $c, k$  分别是阻尼系数、刚度系数;等号右边则是静电力,  $A$  是极板面积;  $\epsilon_0$  是真空介电常数. 先考虑静态情况, 随着直流电压  $V_0$  的增加,  $x_0$  增大, 弹簧回复力  $kx_0$  增大. 刚达到 Pull-in 发生时, 静电力等于弹簧回复力

$$kx_0 = \frac{\epsilon_0 AV_0^2}{2(g_0 - x_0)^2} \quad (2)$$

上式是 Pull-in 发生的第一个条件. 由于有 Pull-in 电压  $V_0$ 、Pull-in 位移  $x_0$  两个未知量, 所以还需要一个方程才能求解.

再考虑动态情况. 将方程(1)在静态工作点  $V_0, x_0$  处线性化, 即做 Taylor 线性展开得小信号模型

$$m \ddot{x}_1(t) + c \dot{x}_1(t) + \left( k - \frac{\epsilon_0 AV_0^2}{(g_0 - x_0)^3} \right) x_1(t) = \frac{\epsilon_0 AV_0}{(g_0 - x_0)^2} v(t) \quad (3)$$

在数学上, 该方程的解  $x_1(t)$  开始发散的条件是刚度项系数为零, 即

$$k = \frac{\epsilon_0 AV_0^2}{(g_0 - x_0)^3} \quad (4)$$

该方程解  $x_1(t)$  发散时对应到物理实质, 就是 Pull-in 失稳现象, 即直流电压  $V_0$  的增加导致小信号模型中刚度系数  $\left( k - \frac{\epsilon_0 AV_0^2}{(g_0 - x_0)^3} \right)$  减小, 即刚度变软直至为零, 进而刚度变负, 失去支撑能力. 此时系统固有频率变为零, 进而变负, 系统解发散, Pull-in 发生开始. 相应的静态工作点  $V_0, x_0$  就是 Pull-in 电压、Pull-in 位移.

联立方程(2), (4)求解可得 Pull-in 发生条件<sup>[6]</sup>

$$\begin{cases} x_{\text{Pull-in}} = x_0 = \frac{g_0}{3} \\ V_{\text{Pull-in}} = V_0 = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon_0 A}} \end{cases} \quad (5)$$

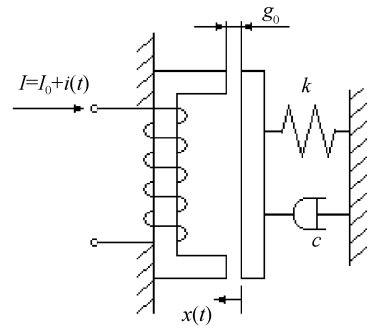


图 2 磁驱动微执行器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of magnetically driven microactuator

## 2.2 基于小信号模型的磁驱动微执行器 Pull-in 失稳模型

图 2 是一种常见的磁驱动微执行器示意图, 设左右两侧铁芯截面积分别为  $A_{\text{core-l}}$  和  $A_{\text{core-r}}$ . 显然本例中, 磁隙截面积  $A_{\text{gap}} = A_{\text{core-l}}$ . 驱动电流  $I = I_0 + i(t)$ ,  $I_0$  是直流偏置电流,  $i(t)$  是小的交流电流分量,  $i(t) \ll I_0$ .  $g_0$  是电流  $I = 0$  时极板间距.  $x(t)$  是活动极板的位移,  $x(t) = x_0 + x_1$ ,  $x_0, x_1$  分别是与  $I_0, i(t)$  对应的直流偏置位移、动态小位移,  $x_1 \ll x_0$ . 同样设活动极板质量为  $m$ , 则活动极板的动力学方程为

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x}(t) + kx(t) = F_M(I, x, t) \quad (6)$$

式中  $F_M(I, x, t)$  是磁力.

先研究  $F_M(I, x, t)$  的计算模型. 图 3 是与图 2 对应的磁路图. 图中,  $U_M = NI$  是磁动势,  $N$  是线圈匝数,  $R_{\text{core-l}}, R_{\text{core-r}}, R_{\text{gap}}$  分别是左侧磁芯磁阻、右侧磁芯磁阻和磁隙磁阻. 在宏观器件中,  $\mu_r$  很大,  $R_{\text{core-l}}, R_{\text{core-r}}$  相对于  $R_{\text{gap}}$  很小, 可以忽略. 但对于磁微执行器器件, 微磁芯磁阻是不可忽略的<sup>[12,13]</sup>. 那么

$$R_{\text{core-l}} = \frac{l_{\text{core-l}}}{\mu_0 \mu_r A_{\text{core-l}}} \quad (7)$$

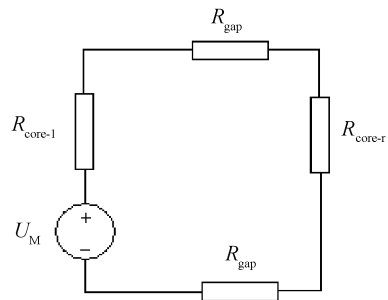


图 3 磁路图

Fig.3 Magnetic circuit diagram

$$R_{\text{core-r}} = \frac{l_{\text{core-r}}}{\mu_0 \mu_r A_{\text{core-r}}} \quad (8)$$

$$R_{\text{gap}} = \frac{g_0 - x}{\mu_0 A_{\text{gap}}} = R_{\text{gap}0} - \frac{x}{\mu_0 A_{\text{gap}}} \quad (9)$$

式中  $l_{\text{core-l}}, l_{\text{core-r}}$  分别是左右两侧磁芯长度;  $R_{\text{gap}0} = \frac{g_0}{\mu_0 A_{\text{gap}}}$  是无驱动电流时的磁隙磁阻.

磁路总能量为

$$W_M = \frac{1}{2} \times \frac{N^2 I^2}{(R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2R_{\text{gap}})} \quad (10)$$

则磁力为

$$F_M(I, x, t) = \frac{\partial W_M}{\partial x} = \frac{N^2 I^2}{\mu_0 A_{\text{gap}} (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2R_{\text{gap}})^2} = \frac{N^2 I^2}{\mu_0 A_{\text{gap}} (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2 \frac{g_0 - x}{\mu_0 A_{\text{gap}}})^2} \quad (11)$$

现在研究 Pull-in 问题. 考虑静态情况, 刚达到 Pull-in 发生时, 磁力应等于弹簧回复力

$$F_M(I_0, x_0) = \frac{N^2 I_0^2}{\mu_0 A_{\text{gap}} (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2 \frac{g_0 - x_0}{\mu_0 A_{\text{gap}}})^2} = kx_0 \quad (12)$$

上式是 Pull-in 发生的第一个条件.

再考虑动态情况. 将方程(6)在静态工作点  $I_0, x_0$  处线性化, 即做 Taylor 线性展开得小信号模型

$$m \ddot{x}_1(t) + c \dot{x}_1(t) + (k - k_M)x_1(t) = \frac{2N^2 I_0}{\mu_0 A_{\text{gap}} (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2 \frac{g_0 - x_0}{\mu_0 A_{\text{gap}}})^2} i \quad (13)$$

式中

$$k_M = \frac{4N^2 I_0^2}{(\mu_0 A_{\text{gap}})^2 (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2 \frac{g_0 - x_0}{\mu_0 A_{\text{gap}}})^3} \quad (14)$$

同样, 当刚度项系数  $k - k_M \leq 0$  时, 该方程解  $x_1(t)$  发散. 对应到物理本质, 就是直流电流  $I_0$  的增加导致小信号模型中刚度变软直至为零, 再进而刚度变负, 失去支撑能力. 此时系统固有频率变为零, 进而变负而无意义, 系统发散, Pull-in 发生开始. 相应的静态工作点  $I_0, x_0$  就是 Pull-in 电流、Pull-in 位移. 则 Pull-in 失稳条件就是

$$k = \frac{4N^2 I_0^2}{(\mu_0 A_{\text{gap}})^2 (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2 \frac{g_0 - x_0}{\mu_0 A_{\text{gap}}})^3} \quad (15)$$

观察 (14) 式可知,  $R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}}$  的出现使得  $k_M$  变小, 刚度项系数  $k - k_M$  更易大于零.

联立方程 (12), (15) 求解可得 Pull-in 电流、Pull-in 位移

$$\begin{cases} x_{\text{Pull-in}} = x_0 = \frac{1}{6} [2g_0 + (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}})\mu_0 A_{\text{gap}}] \\ NI_{\text{Pull-in}} = NI_0 = \sqrt{\frac{2k[(R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}})\mu_0 A_{\text{gap}} + 2g_0]^3}{27\mu_0 A_{\text{gap}}}} \end{cases} \quad (16)$$

在宏观器件中, 磁芯相对磁导率  $\mu_r$  很大,  $R_{\text{core-l}}$  和  $R_{\text{core-r}}$  很小而被忽略, 这时 (16) 式简化为

$$\begin{cases} x_{\text{Pull-in}} = x_0 = \frac{1}{3} g_0 \\ NI_{\text{Pull-in}} = NI_0 = \sqrt{\frac{16kg_0^3}{27\mu_0 A_{\text{gap}}}} \end{cases} \quad (17)$$

该式与静电微执行器 Pull-in 失稳条件<sup>[7]</sup>非常相似.

### 2.3 基于能量法的磁驱动微执行器 Pull-in 失稳模型

为了确认 2.2 节的正确性, 现从能量的角度来建立 Pull-in 失稳模型. 磁微执行器的余能<sup>[7]</sup>为

$$W(x, U_M) = W_{\text{mech}}(x) - W_M(x, U_M) \quad (18)$$

式中  $W_{\text{mech}}(x) = \frac{1}{2} kx^2$  为机械储能;  $W_M(x, U_M) = \frac{U_M^2}{2R(x)} = \frac{N^2 I^2}{2R(x)}$  为电磁储能,  $R(x) = R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} + 2R_{\text{gap}}; U_M = NI$  为磁动势. 则 (18) 式的总余能可以写为

$$W(x, U_M) = \frac{1}{2} kx^2 - \frac{U_M^2}{2R(x)} \quad (19)$$

当  $U_M$  为常数, 系统达到平衡状态时, 应有

$$\frac{\partial W(x, U_M)}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

当 Pull-in 现象刚发生时, 应有

$$\frac{\partial^2 W(x, U_M)}{\partial x^2} = 0 \quad (21)$$

由 (19), (20), (21) 式可以得到

$$\frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial x} - \frac{U_M^2}{2} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{R(x)} \right) \right) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial^2 W_{\text{mech}}}{\partial x^2} - \frac{U_M^2}{2} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{1}{R(x)} \right) \right) = 0 \quad (23)$$

上两式中消去  $U_M$ , 可得两个求 Pull-in 参数的方程

$$\left[ \left( \frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( \frac{1}{R(x)} \right) \right) - \left( \frac{\partial^2 W_{\text{mech}}}{\partial x^2} \right) \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{R(x)} \right) \right) \right]_{x=x_{\text{Pull-in}}} = 0 \quad (24)$$

$$U_{M, \text{Pull-in}} = \sqrt{2 \left[ \left( \frac{\partial W_{\text{mech}}}{\partial x} \right) / \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{R(x)} \right) \right) \right]_{x=x_{\text{Pull-in}}}} \quad (25)$$

求解以上两式得

$$\begin{cases} x_{\text{Pull-in}} = \frac{1}{6} [2g_0 + (R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}})\mu_0 A_{\text{gap}}] \\ U_{M, \text{Pull-in}} = NI_{\text{Pull-in}} = \sqrt{\frac{2k[(R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}})\mu_0 A_{\text{gap}} + 2g_0]^3}{27\mu_0 A_{\text{gap}}}} \end{cases} \quad (26)$$

表 1 磁微梁执行器参数

Table 1 Parameters of the magnetic microactuator

参数	数值
初始极板间距 $g_0$	$10\mu\text{m}$
磁隙面积 $A_{\text{gap}}$	$1750000\mu\text{m}^2$
磁心面积 $A_{\text{core-l}} = A_{\text{core-r}}$	$120000\mu\text{m}^2$
磁心长度 $l_{\text{core}} = l_{\text{core-l}} + l_{\text{core-r}}$	$3478\mu\text{m}$
线圈匝数 $N$	17
弹簧刚度系数 $k$	$0.166\text{N}/\mu\text{m}$
真空磁导率 $\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}\text{H}/\text{m}$
磁心相对磁导率 $\mu_r$	5000

比较(26)和(16)式可知,能量法与力法所得结论一致.但能量法不如力法直接明了.

由(16)式可知,磁芯磁阻  $R_{\text{core}} = R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}}$  的存在,使得 Pull-in 发生位置超过了  $\frac{1}{3}g_0$ ,当

$$R_{\text{core}} = R_{\text{core-l}} + R_{\text{core-r}} \geq \frac{4g_0}{\mu_0 A_{\text{gap}}} = 4R_{\text{gap0}} \quad (27)$$

Pull-in 发生位置超过了整个间隙距离  $g_0$  时,微执行器在全行程上是稳定的.当微磁芯磁阻  $R_{\text{core}} = 4R_{\text{gap0}}$  时,微执行器的行程刚好达到  $g_0$ ,对应的磁动势为  $NI_0 = \sqrt{\frac{16kg_0^3}{\mu_0 A_{\text{gap}}}}$ .

### 3 算例分析

图 2 是本例中磁驱动微执行器结构示意图,设  $A_{\text{core-l}} = A_{\text{core-r}}$ ,参数采用了文献[12,13]中的磁微执行器参数,数值见表 1.

图 4 是极板间距  $g_0 - x$  关于直流电流  $I_0$  变化的数值计算结果.图中,虚线表示磁芯磁阻被忽略

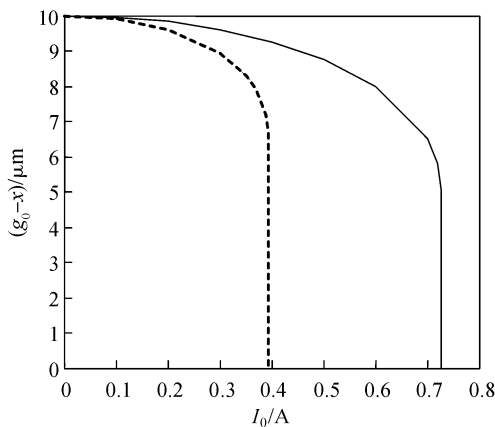


图 4 极板间距关于直流电流  $I_0$  变化的数值计算结果 虚线:未考虑磁芯磁阻;实线:考虑磁芯磁阻  
Fig. 4 Numeric simulation results of gap as a function of DC  $I_0$

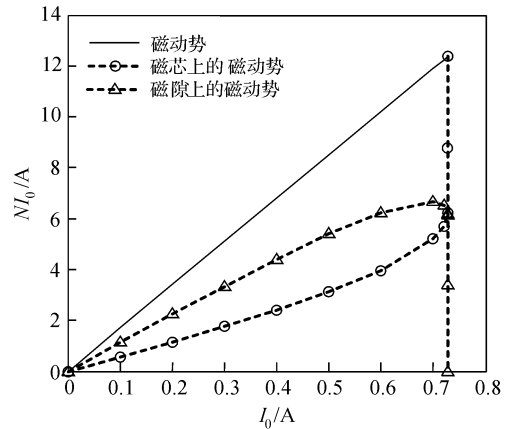


图 5 作用在磁隙和磁芯上的磁动势  
Fig.5 Magnetomotive force acting on magnetic gap and magnetic core

的计算结果,Pull-in 位置在  $g_0/3$  处;实线表示考虑磁芯磁阻的计算结果.图中,磁芯磁阻的存在,使得 Pull-in 位置明显超过  $g_0/3$ ,约在  $g_0/2$  处,Pull-in 电流也显著增高.这就是说磁芯磁阻的存在,提高了微执行器的行程.但也必须看到,同无磁芯磁阻的执行器相比,在  $g_0/3$  以内,为了达到同样的位移,具有磁芯磁阻的执行器需要更大的电流(磁动势).这是磁芯磁阻带来的缺点.

图 5 反映的是作用在磁隙和微磁芯上的磁动势随驱动电流的变化情况.对于宏观器件,磁芯磁阻约等于 0,Pull-in 发生之前,磁动势全部作用在磁隙上.但对于微观器件,微磁芯磁阻与磁隙磁阻串联配置,分担部分磁动势.磁芯磁动势与磁阻磁动势之和等于总磁动势  $NI_0$ .当驱动电流增加时,磁隙逐渐减小,磁隙磁阻逐渐减小,Pull-in 发生时,磁隙 = 0,磁隙磁阻 = 0,磁动势全部作用在微磁芯磁阻上.

### 4 结论

本文利用力法,考虑了微磁芯磁阻,导出了 Pull-in 失稳条件.计算方法简单明了,物理意义明显,易于理解,对该类执行器设计有一定参考价值.

#### 参考文献

[ 1 ] Degani O, Socher E, Lipson A, et al. Pull-In study of an electrostatic torsion microactuator. J Microelectromech Syst, 1998, 7(4): 373  
[ 2 ] Xiao Z X, Wu X T, Peng W Y, et al. An angle-based design approach for rectangular electrostatic torsion actuators. J Microelectromech Syst, 2001, 10(4): 561  
[ 3 ] Degani O, Nemirosky Y. Design considerations of rectangular electrostatic torsion actuators based on new analytical pull-in expressions. J Microelectromech Syst, 2002, 11(1): 20

- [4] Seeger J I, Boser B E. Charge control of parallel-plate, electrostatic actuators and the tip-in instability. *J Microelectromechan Syst*, 2003, 12(5): 656
- [5] Castaner L, Pons J, Nadal-Guardia R, et al. Analysis of the extended operation range of electrostatic actuators by current-pulse drive. *Sensors and Actuators A*, 2001, 90: 181
- [6] Senturia S D. *Microsystem design*. Boston/London/Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 2000
- [7] Nemirovsky Y, Bochobza-Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of electrostatic actuators. *J Microelectromechan Syst*, 2001, 10(4): 601
- [8] Bochobza-Degani O, Nemirovsky Y. Modeling the pull-in parameters of electrostatic actuators with a novel lumped two degrees of freedom pull-in model. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97/98: 569
- [9] Bochobza-Degani O, Elata D, Nemirovsky Y. A general relation between the ranges of stability of electrostatic actuators under charge or voltage control. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(2): 302
- [10] Elata D, Bamberger H. On the dynamic pull-in of electrostatic actuators with multiple degrees of freedom and multiple voltage sources. *J Microelectromechan Syst*, 2006, 15(1): 131
- [11] Nemirovsky Y, Zelniker I, Degani O. A methodology and model for the pull-in parameters of magnetostatic actuators. *J Microelectromechan Syst*, 2005, 14(6): 1253
- [12] Ahn C H, Allen M G. A fully integrated surface micromachined magnetic microactuator with a multilevel meander magnetic core. *J Microelectromechan Syst*, 1993, 2(1): 15
- [13] Nami Z, Ahn C H, Allen M G. An energy-based design criterion for magnetic microactuators. *J Micromech Microeng*, 1996, 6(3): 337
- [14] Fang Yuming, Huang Qing'an, Li Weihua. A mechanics-magnetic coupling macromodel for a magnetic microactuator with a multilevel meander. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(12A): 2194 (in Chinese) [方玉明, 黄庆安, 李伟华. 多级弯曲磁微梁执行器力-磁耦合宏模型. *电子学报*, 2003, 31(12A): 2194]
- [15] Fang Yuming, Huang Qing'an, Li Weihua. A mechanical-magnetic coupling macromodel for a magnetic microbeam actuator. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(8): 1599 (in Chinese) [方玉明, 黄庆安, 李伟华. 考虑磁芯磁阻的分布参数微梁执行器小信号模型. *半导体学报*, 2005, 26(8): 1599]

## A Model for the Pull-In Phenomenon of Magnetic Microactuators with the Reluctance of Magnetic Cores\*

Fang Yuming<sup>1,2</sup>, Huang Qing'an<sup>1,†</sup>, and Li Weihua<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(2 Department of Optoelectronics Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** A generalized force approach is used to model the instability of magnetic microactuators. The reluctance of the magnetic core is considered. The critical value of applied current, beyond which the dynamic response of the small gain model becomes unstable, is investigated and the Pull-in equation is derived. Then a generalized energy approach is used to model the same problem. The results of the two approaches are identical. Finally, a case of the magnetic microactuator, illustrating the use of the Pull-in parameters, is presented.

**Key words:** magnetic; microactuator; Pull-in

**EEACC:** 2575; 8460

**Article ID:** 0253-4177(2007)10-1647-05

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA431010) and the Natural Science Research Program for Universities in Jiangsu Province of China (No. 03KJB510089)

† Corresponding author. Email: hqa@seu.edu.cn

Received 5 January 2007, revised manuscript received 7 June 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics