

# 电磁微电机中微小电磁力的研究<sup>\*</sup>

吕琼莹

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

车录锋

(浙江大学机械系, 杭州 310027)

**摘要** 研究了电磁微电机中线圈对线圈、线圈对磁体的微小电磁作用力, 并分析了其分布特性, 得出了一些重要结构, 对电磁微电机的设计和完善有一定指导作用。

**关键词:** 电磁微电机; 微小电磁力; 微尺寸磁场

## 1 引言

八十年代末期, 随着微细加工技术的不断发展, 微型机械作为一门新兴学科引起了世界各国科学家和政府部门的高度重视, 并有迅猛发展的趋势, 它将广泛用于工业、农业、航空、航天、生物医学和家庭服务各个领域。微电机作为微机械的动力源无疑是研究的热点, 一旦微驱动技术获得突破, 将有可能在此基础上构造实用化的可动微系统, 从而带动微机械整体技术的全面发展。为了使微电机在微机械中得到应用, 当前首要任务是设法提高微电机的力能指标, 并以此为基础解决微电机的实用化问题; 而电磁微电机就其动力性能而言, 是目前各种微电机中最强的。这表明了电磁电机在微型化方面具有较大的潜力, 同时也表明作为通用型的微小动力元件, 这种微电机有可能率先达到实用化。所以我们有必要对电磁微电机的换能理论作深入的研究, 从而找到微尺寸磁场相互作用的规律, 推进电磁微电机的实用化进程。本文对微线圈之间、微线圈与微磁体之间的相互作用作了深入的研究。

## 2 两同轴微线圈之间的微小电磁力

两同轴平行微线圈(细圆环)半径分别为  $R$  和  $r$ , 距离为  $Z$ , 通有电流  $I_1$ 、 $I_2$  根据纽曼公式可求互感<sup>[1]</sup>:

\* 收稿日期: 1996年12月9日

国家科委攀登计划 B 重点资助项目

$$L_{12} = \frac{\mu_0 R r}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos \varphi_1 d\varphi_1 d\varphi_2}{(z^2 + R^2 + r^2 - 2Rr \cos \varphi)^{\frac{1}{2}}}$$

本系统磁能力:

$$W_m = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + L_{12} I_1 I_2$$

故相互作用力为:

$$F_z = - \frac{\mu_0 I_1 I_2 z}{[z^2 + (R+r)^2]^{\frac{1}{2}}} \left[ \frac{z^2 + R^2 + r^2}{z^2 + (R-r)^2} E\left(\frac{\pi}{2}, k\right) - F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) \right]$$

式中:  $\mu_0$ ——真空磁导率;

$F(\pi/2, k)$ ——第一类完全椭圆积分;

$E(\pi/2, k)$ ——第二类完全椭圆积分。

首先假定激磁线圈半径  $R = 0.02 \sim 1.0$  mm, 匝数为20匝, 所通电流0.1 A, 受力线圈半径  $r = 0.32 \sim 0.8$  mm, 匝数为10匝, 通电流也为0.1 A。编程计算可得相互作用力随距离的变化曲线如下:

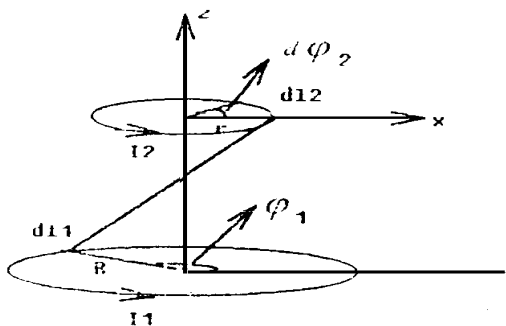


Fig. 1 Interacted force between microcoils

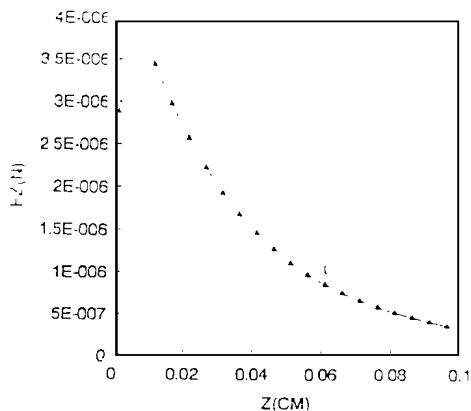


Fig. 2 Curve of interactaed force

分析曲线可知: 当微线圈尺寸确定以后, 两个线圈之间的最大作用力也随之确定, 并且两线圈之间的距离也随之确定了。这就为设计微机械执行器提供了理论基础。例如微机械可控镊子, 可利用线圈的通断电来控制镊子的夹持与松开, 夹持时应该有最大吸引力。

### 3 微线圈微磁体之间的微小电磁力

可假定永磁体均匀磁化, 根据等效磁荷的观点, 可把均匀磁化的永磁体看成是正负磁荷分别集中于两个端面的磁偶矩。某面积元上的磁荷在距离为  $r$  的空间某点  $p$  处产生的磁场强度为<sup>[2]</sup>:

$$H_{px} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{B_r \cos \delta}{r^2} \cos \varphi_s$$

$$B_{px} = \mu_0 H_{px}$$

式中  $\delta$  为磁极面积元的法线与磁化方向的夹角。

$\varphi$  为磁极面面积元与场点  $p$  的连线与  $\bar{x}_0$  矢量的夹角。对于图 3 圆柱形永磁体, 求其轴线平面上上端面右上方  $p$  点处的  $B_R, B_z$ 。令端面磁荷面密度为  $\sigma_m$ , 在数值上  $\sigma_m = J = B_r$ , 则正磁荷在  $p$  点产生的磁感应强度为:

$$B_{\vec{r}} = \frac{B_r}{2\pi r} \int_0^R \left\{ \frac{r^2 - z^2 - r'^2}{[z^2 + (r+r')^2]^{\frac{3}{2}}} \Pi\left(\frac{\pi}{2}, k, k\right) + \frac{1}{z^2 + (r+r')^2} F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) \right\} dr'$$

式中  $k = k = \frac{4rr'}{z^2 + (r+r')^2}$

$B_r$  —— 材料的剩磁;

$\Pi(\pi/2, k, k)$  —— 第三类完全椭圆积分。

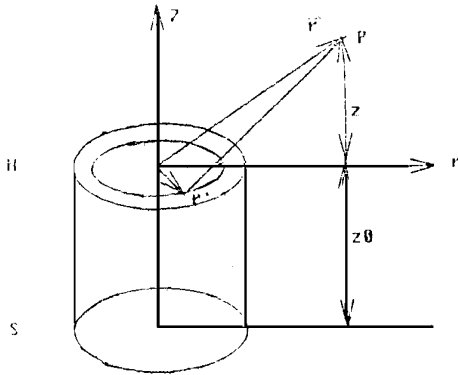


Fig. 3 Magnetic field of magnet

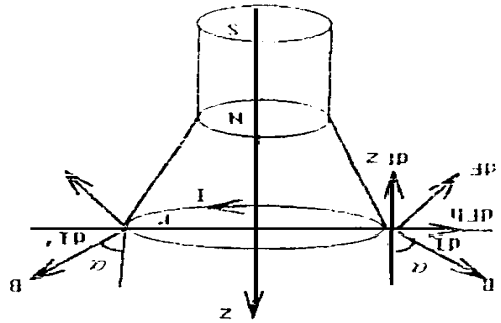


Fig. 4 interacted force of microcoils and micromagnet

以  $z + z_0$  代替  $z$  可得  $B_{\vec{r}}$ 。一圆柱形磁铁 N 极的正上方有一半径为  $r$  的水平圆线圈, 其中通过逆时针电流  $I$  (俯视)。线圈所处磁场  $B$  方向都与竖直方向成  $\alpha$  角(两者中心在一条铅直线上)。线圈所受总的磁吸引力为:

$$F = F_z = \int_0^{2\pi} dF_z = \int_0^{2\pi} IB_R dl = IB_R * 2\pi$$

式中

$$B_R = B_{\vec{r}} - B_{\bar{r}}$$

编程可计算出磁铁对线圈的吸引力。设磁铁的材料为稀土永磁钕铁硼, 假定其半径 1.0 mm, 长度为 2.0 mm, 磁化强度为 1.1 T, 线圈所通电流为 0.1A, 线圈内径为 2.0 mm, 外径为 2.98 mm, 匝数  $N = 20$ , 所得曲线如图 5 所示。

分析上述曲线可知, 当线圈尺寸与匝数, 磁铁尺寸大小确定时, 二者的吸引力很明显有一极大值。因些在设计电磁微电机时, 总是追求力矩的增大, 所以有效磁隙的确定应该以上述分

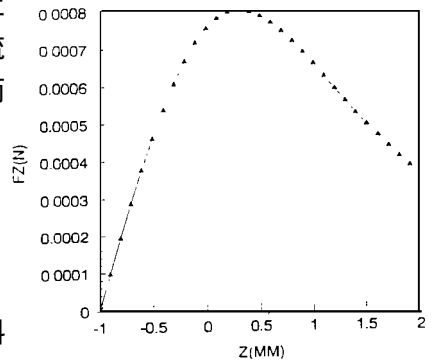


Fig. 5 Curve of interacted force

析结果为依据,这就为优化模型机的机电参数提供了必要的手段。

## 4 结 论

目前关于微电机的换能理论还不甚成熟,对微电机的研究还处于摸索阶段。本文研究了平面微线圈之间,平面微线圈与微磁体之间微小电磁力的分布特性,也有一定的参考价值。总之,它丰富了关于微电机的理论,对电磁微电机的设计和完美,有一定的指导作用。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 林为干,符果行. 电磁场. 北京:人民邮电出版社,1985
- [ 2 ] 沙震亚. 永磁体磁场的解析计算新方法及其应用举例. 中科院电工所论文集,1982,2: 46
- [ 3 ] 车录锋. 微机械电磁电机换能理论中若干基本问题的研究. 中科院长春光机所硕士论文,1996

## Study on Micro Electromagnetic Force in Electromagnetic Micromotor

Lu Qiongying

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Science, Changchun 130022*)

Che Lufeng

(*Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

### Abstract

In this paper, micro electromagnetic force between microcoils, between microcoils and micromagnet in electromagnetic micromotor is studied, its distribution features are analyzed. Some important conclusions have been reached, which direct design and development of electromagnetic micromotor.

**Key words:** Electromagnetic micromotor, Micro electromagnetic force, Micro size magnetic field

吕琼莹 男,1963年10月20日生。1984年毕业于吉林工业大学。从事微机械电机为主的微机械研究。曾组织研制出国内首台3毫米压电微电机。