

# 电磁驱动式微小夹持器的研制

孙 萍 孙麟治

(上海大学机电工程学院 精密机械工程系, 上海 201800)

**摘要** 概述了集成化微小夹持器的研制现状,介绍了电磁驱动式斜楔机构微小夹持器的结构设计、实验以及关键零件的确定。

**关键词:** 微小机械; 电磁驱动; 夹持器

## 1 引 言

近年来,由于高新技术的迅速发展,精密机械领域的研究向着微小化、智能化的方向发展。以微米级尺寸为特征、采用集成电路制造技术或 LIGA 技术等微加工技术制作的微机械(Micromechanism)和以毫米级尺寸为特征、采用现代精密机械加工技术制作的微小机械(Millimechanism)同是精密机械学科延伸发展的两个新的生长点<sup>[1]</sup>。它们已成为国际科技界瞩目的重点研究方向之一。

微小机械在其自身结构尺寸所定义的的工作环境和界面中,具有其它尺寸限的机械不可替代的作用。在医疗、微电子精细加工、微组装技术以及航空航天等高科技领域中,都有着非常迫切的研究开发需求和广泛的应用前景。同时,也是加速微型机械实用化的重要途径。

微小机械的研究目标之一在于开发出具有各种不同功能的微小机器人。一个微小机器人系统通常有四个组成部分,即能量转换部分(S)、控制部分(C)、位置决定部分(A<sub>p</sub>)以及执行部分(A<sub>e</sub>),如图1所示。目前,对行走机构的研究较为广泛,国内外的研究成果不断推出。而对夹持机构的研究却报导很少。微小夹持机构无论对工业生产的应用或者对微小机械的实用化都是不可缺少的重要组成部分。因此,我们着力对微小夹持器进行了一些探索性的研制。

最初,我校研制了压电晶体驱动的集成化微小夹持器<sup>[2]</sup>。它是将压电晶体镶嵌在柔性铰链机构的中部,并施加相应的电压,使电能转换成机械能来实现夹持功能的集成化组件。其特点是结构简单、可以精确地控制位移输出量、无间隙、无摩擦。图2示出的是几种压电晶体驱动式微小夹持器的模型<sup>[2]</sup>。图中件号1是压电晶体,件号2是夹持机构。图2a是单级柔性铰链机构的微小夹持器;图2b是剪刀型二级放大机构的微小夹持器;图2c是两层二级柔性铰链机构的微小夹持器。图2b和图2c是在单级柔性铰链机构的基础上增加了不同形式的二级放大机构,实现了位移的两次放大。

但是,压电晶体的变形量是很有限的( $6.5 \mu\text{m}/100 \text{V}$ ),尽管在机构上实现了一级或二级变形量的放大,夹持端的开合量仍然不大,一般只有  $120\sim 150 \mu\text{m}/100 \text{V}$ ,限制了它的应用范围。为此,我们又研制了另一种微小夹持器——电磁驱动式微小夹持器,以求扩大夹持器的开口量,适应大开口量的应用场合。

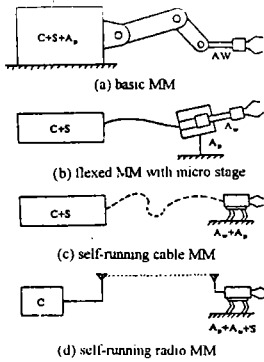


图 1 微小机器人系统的形式  
Fig. 1 Classification of millirobot system

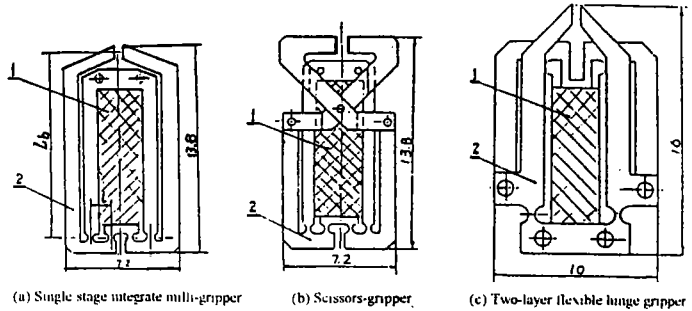


图 2 压电晶体驱动式微小夹持器  
Fig. 2 Milli-grippers using piezoelectric actuator

## 2 结构与动作原理

电磁驱动式微小夹持器是以电磁力作驱动源,带动斜楔推动夹爪实现夹持动作,即将电能转换为机械能实现夹持功能的组件。电磁力驱动的特点在于动作响应快。斜楔式传动夹持机构的特点是具有较大的动作范围。图 3 是该夹持器的构造图。它由驱动元件 1、夹爪 2、斜楔 3、定位块 4、拉伸弹簧 5 以及转动销 6 等零部件组成。驱动元件 1 由 JRC-21F 型超小功率微型继电器改制而成,其组成部分包括铁芯、线圈、衔铁和返回弹簧。线圈通电时,电磁铁产生电磁吸力,克服返回弹簧的拉力后,吸合衔铁,由衔铁带动斜楔 3 做纵向移动,移动过程中由其两侧的斜楔面推动夹爪 2,使夹爪 2 的底部绕转动销 6 向外转动,夹爪端口则向内转动,从而实现夹持动作。线圈失电后,电磁吸力减小,衔铁在返回弹簧的拉力作用下,回到打开位置,同时带动斜楔 3 沿定位块 4 向后移动,夹爪底端由拉伸弹簧 5 拉回原始位置,使夹爪端口张开,夹持机构恢复到非工作状态。

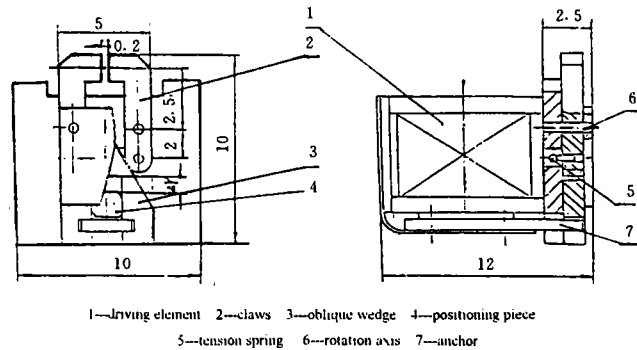


图 3 电磁驱动式微小夹持器  
Fig. 3 A milli-gripper using electr-magnetic force

### 3 分析计算

电磁驱动式微小夹持器是靠电磁吸力产生动作的,吸力的大小直接影响夹持机构的运行。而影响电磁吸力的一个重要因素则是衔铁与电磁铁之间的间隙(称为工作气隙)。由图 3 知,斜楔板的行程是  $\Delta Y$ ,由于衔铁与斜楔板联接为一体,故  $\Delta Y$  可示为电磁铁的主工作气隙 ( $\delta_1$ ),即  $\delta_1 = \Delta Y$ ,其值过大过小都将影响夹持机构的运行。经反复试验、推算得出该电磁铁的  $\delta_1$  在 0.4~0.6 mm 时,工作状态最佳。

由能量平衡法导出电磁吸力  $F$ , 公式<sup>[3]</sup>

$$F_y = -\frac{1}{2} \mu_0^2 \frac{dG_\delta}{d\delta} \text{ (N)} \quad (1)$$

式中  $\mu_0$  为气隙的磁压降(A);  $G_\delta$  为气隙的磁导(H);  $\delta$  为气隙的大小(m)。

磁系统形状如图 4 所示。今从电磁学的理论计算气隙的磁导  $G_\delta$  和气隙的磁压降  $\mu_\delta$ 。

该磁系统的气隙由主工作气隙  $\delta_1$ 、楞角气隙  $\delta_2$  以及非工作气隙  $\delta_3$  三部分组成,各部分气隙磁导计算如下,图 5 为气隙结构图。

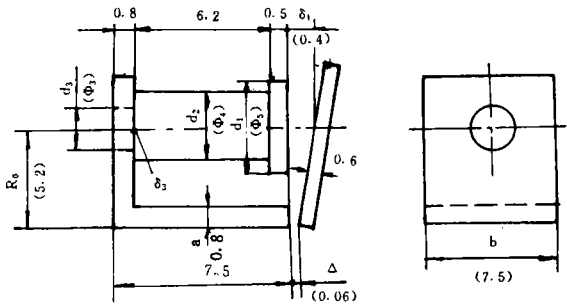
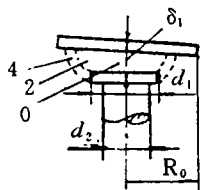
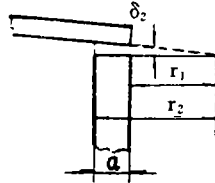


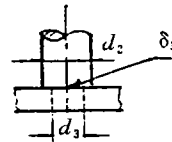
图 4 磁系统形状和尺寸  
Fig. 4 Shape and size of electro-magnetic system



(a) Main working air space



(b) Air space of edge angle



(c) Air space between iron core and bottom iron

图 5 气隙结构图

Fig. 5 Diagram of air space

#### 3.1 主工作气隙磁导 $G_{\delta_1}$

如图 5a 所示,用分割磁场法将磁场分成 0、2 及 4 三个磁通管进行计算,即

$$G_{\delta_1} = G_0 + G_2 + G_4 \quad (2)$$

而

$$G_0 = \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot d_1^2}{4\delta_1} x_1 \quad (3)$$

$$x_1 = 2\rho_1(\rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - 1})$$

$$\rho_1 = \frac{2R_0}{d_1(1 - \frac{\Delta}{\delta_1})}$$

$$\mu_0 = 1.25 \times 10^{-6} \quad (\text{H/m})$$

$$G_2 = 0.52\mu_0(\pi d_1 + \frac{8}{3}\delta_1) \quad (4)$$

( $G_2$  为变截面的 1/4 圆旋转体)

$$G_4 = \mu_0 \frac{2L_4}{\pi} \ln(1 + \frac{m}{\delta_1}) \quad (5)$$

( $G_4$  为变截面的 1/4 圆旋转体)

$$L_4 = 2\pi \{ \frac{d_1}{2} + \frac{4(\delta_1 + m)^2 - \delta_1^2}{3\pi[(\delta_1 + m)^2 - \delta_1^2]} \} \quad (6)$$

$m$ —边缘散磁场的扩展宽度  $m = (1 \sim 2)\delta_1$ , 这里取  $m = \delta_1$

$\delta_1$ —主工作气隙, 考虑镀层  $\delta_1 = 0.4 + 2 \times 0.015 = 0.43$

故

$$G_{s_1} = (6.14 + 1.10 + 1.01) \times 10^{-8} = 8.25 \times 10^{-8} \quad (\text{H})$$

### 3.2 楞角气隙磁导 $G_{s_2}$

如图 5b 所示, 忽略边缘散磁, 则  $G_{s_2}$  可用式

$$G_{s_2} = 1.25 \times 10^{-8} \frac{b}{\theta} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (7)$$

$$b = 7.5 \text{ mm}$$

$$\theta \approx \frac{\delta_1}{R_0}$$

$$r_1 = \frac{\delta_2}{\theta}$$

$$r_2 = r_1 + 0.8$$

$$\delta_2 = 2 \times 0.015 + 0.03 = 0.06(\text{mm})(\text{考虑镀层})$$

故

$$G_{s_2} = 8.6 \times 10^{-8}(\text{H})$$

### 3.3 铁芯和底铁连接处磁导 $G_{s_3}$

图 5c 所示

$$G_{s_3} = \frac{\mu_0 S}{\delta_3} \quad (8)$$

Table 1 Calculation table

$\Phi_s(Wb)$ $\times 10^{-8}$	$B_1(T)$	$B_2(T)$	$H_1$ (A/cm)	$H_2$ (A/cm)	$l_1(\text{cm})$	$l_2(\text{cm})$	$IW(A)$
700	1.56	1.17	14	2.9	0.52	1.82	191.76
750	1.67	1.25	38	3.5	0.52	1.82	218.60
800	1.78	1.33	60	4.8	0.52	1.82	244.74
850	1.90	1.42	120	7.0	0.52	1.82	292.74

$\delta_3$ —镀层厚度(镀锌层为 0.015),  $\delta_3 = 2 \times 0.015 = 0.03(\text{mm})$  故

$$G_{\delta_2} = 54.32 \times 10^{-8} (\text{H})$$

我们实测出线圈电流  $I = 0.067\text{A}$ , 匝数  $W$  为 3600 匝, 则  $IW = 241.2(\text{A})$ , 然后, 用猜试插值的方法计算出气隙磁通值. 计算过程如下:

由下式估计一个  $\Phi_{\delta}$  值

$$\Phi_{\delta} = \frac{(IW) \times K_c}{\frac{1}{G_{\delta_1}} + \frac{1}{G_{\delta_2}} + \frac{1}{G_{\delta_3}}} \quad (9)$$

$K_c$  为影响系数, 一般  $K_c = 0.9$

通过  $B = \frac{\Phi_{\delta}}{S}$  计算衔铁和铁芯及铁轭中的磁通密度  $B$ , 再由导磁体材料的磁化曲线查出对应的磁场强度  $H^{[4]}$ , 代入线圈磁势计算式

$$IW = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta_1}} + \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta_2}} + \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta_3}} + H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 \quad (10)$$

$H_1$ — 衔铁的磁场强度

$H_2$ — 铁芯和衔铁及铁轭的磁场强度

$l_1, l_2$ — 分别为衔铁和铁芯及铁轭的平均长度

在此值上下选取 4 个  $\Phi_{\delta}$ , 重复上述计算过程. 计算结果在表 1 示出, 并将结果和  $\Phi_{\delta}$  之间的关系曲线表示, 如图 6 所示, 该曲线  $\Phi_{\delta} = f(IW)$  就是磁系统的磁化曲线. 由此曲线找出与  $IW = 241.2$  安匝对应的工作气隙磁通  $\Phi_{\delta} = 795 \times 10^{-8}$

气隙的磁压降  $\mu_{\delta}$  由下式计算

$$\mu_{\delta} = \frac{\Phi_{\delta}}{G_{\delta_1}} = \frac{795 \times 10^{-8}}{8.25 \times 10^{-8}} = 96.4 (\text{A}) \quad (4)$$

又

$$\frac{dG_{\delta_1}}{d\delta_1} = \frac{dG_{\delta_0}}{d\delta_1} + \frac{dG_{\delta_2}}{d\delta_1} + \frac{dG_{\delta_4}}{d\delta_1} \quad (11)$$

而

$$\begin{aligned} \frac{dG_0}{d\delta_1} &= \left( \frac{\mu_0 \cdot \pi \cdot d_1^2}{3\delta_1} \cdot x_1 \right)' = - \frac{\mu_0 \pi d_1^2}{4\delta_1^2} \cdot x_1 \\ \frac{dG_2}{d\delta_1} &= \left[ \mu_0 \times 0.52 \times 2\pi \left( \frac{d_1}{2} + \frac{4\delta_1}{3\pi} \right) \right]' = \mu_0 \times 0.52 \times 2\pi \times \frac{4}{3\pi} \\ \frac{dG_4}{d\delta_1} &= \left[ \mu_0 \times 4 \left( \frac{d_1}{2} + \frac{28}{9\pi} \delta_1 \right) \ln 2 \right]' = \mu_0 \times 4 \times \frac{28}{9\pi} \ln 2 \end{aligned}$$

因此

$$\begin{aligned} \left[ \frac{dG_{\delta_1}}{d\delta_1} \right]_{\delta_1=0.43 \times 10^{-3}} &= (-142.83 + 1.73 + 3.43) \times 10^{-6} \\ &= -137.67 \times 10^{-6} (\text{H/m}) \end{aligned}$$

电磁吸力  $F$ , 为

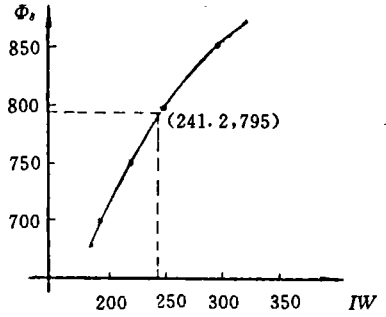


图 6 磁系统的磁化曲线

Fig. 6 Magnetizing curve of electro-magnetic system

$$F_y = -\frac{1}{2}\mu_0^2 \cdot \frac{dG_z}{d\delta_1} = -\frac{1}{2}(96.4)^2(-137.67 \times 10^{-6}) = 0.638(\text{N})$$

下面进行夹持机构放大倍数的计算。由于楔形机构尺寸较小，夹持部件上的拉伸弹簧的弹力决定着机构的平稳性和运动的灵敏度。图7为斜楔机构的运动分析图。

$$\Delta X = AA' + AB(1 - \cos\beta) \quad (12)$$

而

$$AA' = l_2 \cdot \sin\beta$$

$$\sin\beta = \frac{C'D}{l_1} = \frac{\Delta Y \cdot \tan\alpha}{l_1}$$

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \sin^2\beta} = \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta Y \tan\alpha}{l_1}\right)^2}$$

代入(11)式得

$$\Delta X = \frac{\Delta Y \cdot l_2}{l_1} \tan\alpha + AB \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta Y \cdot \tan\alpha}{l_1}\right)^2} \right] \quad (13)$$

当斜楔板的行程  $\Delta Y$  在 0.4 ~ 0.6 mm 时，且  $\left(\frac{\Delta Y \cdot \tan\alpha}{l_1}\right)^2 \approx 0$ ，则该机构的位移放大倍数为

$$2 \frac{\Delta X}{\Delta Y} = 2 \frac{l_2}{l_1} \cdot \tan\alpha = 1.443$$

夹持器端口张合量  $2\Delta X$  为

$$2\Delta X = 0.577 \sim 0.866 \quad (\text{mm})$$

拉簧的尺寸规格由力学分析决定。由图7可测出各力之间的力矩平衡方程式

$$F_x \cdot l_2 - \frac{F_y}{2 \cdot \sin\alpha} \cdot \cos\alpha \cdot l_1 + 2K \cdot C'D \cdot l_1 = 0 \quad (14)$$

式中  $K$  为弹簧的弹性系数。

空载时 ( $F_x = 0$ )，机械所需的电磁推动力应为

$$F_y = 4 \cdot K \cdot C'D \cdot \tan\alpha = 4 \cdot K \cdot \Delta Y \cdot \tan^2\alpha$$

将电磁铁的吸力  $F_y = 0.638\text{N}$  代入上式，得到拉簧的弹性系数  $K$ ：

$$K = \frac{F_y}{4 \cdot \Delta Y \cdot \tan^2\alpha} = \frac{0.638}{4 \times 0.4 \cdot \tan^2 30^\circ} = 1.2$$

由  $K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C}$  导出弹簧指数  $C = 7.4$ 。

考虑到总体结构的尺寸不能太大，弹簧中径  $D_2 \leq 1.2\text{mm}$ ，我们取  $D_2 = 1.2\text{mm}$ 。

由关系式  $C = D_2/d$  计算出弹簧线径尺寸。

$$d = \frac{D_2}{C} = \frac{1.2}{7.4} = 0.162 \quad (\text{mm})$$

靠标准规格  $d = 0.15\text{mm}$ 。

弹簧材料应具有防磁性能好，故选用  $QB_{22}$  青铜丝。其剪切弹性模量  $G = 43000\text{MPa}$ ，弹性模量为  $E = 132000\text{MPa}$ <sup>[4]</sup>。通过上述参数，可换算出拉簧的其它尺寸，从而拉簧规格得以确

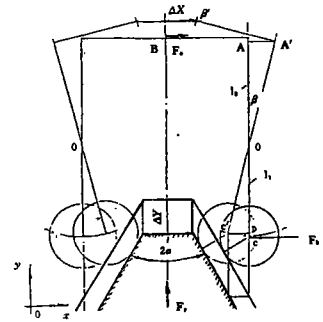


图7 斜楔机构分析图

Fig. 7 schematic diagram of structure of the oblique wedge

定。

## 4 实 验

电磁驱动式微小夹持器的实验在如图8所示装置上进行,夹持张开量的测量装置如图8a所示,由电压控制器对电磁铁线圈施加23V电压(额定电压值为24V),衔铁的工作气隙  $\Delta Y$  调到0.5 mm,使夹持器夹紧→放松过程中,采用数显量规测量其开口端的张合量  $2\Delta X$  值,测量数据见表2。夹持器开口端的平均张合量为0.719,动作平稳,吸合时间是15 ms,释放时间是5 ms。

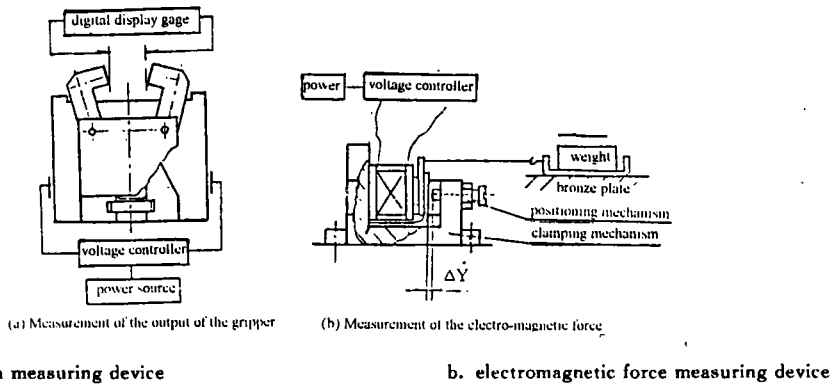


图8 测量装置示意图

Fig. 8 Scheme of test of displacement

Table 2 Measured value

measuring frequency $N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
output of displacement $2\Delta X$	0.693	0.698	0.731	0.767	0.799	0.698	0.800	0.676	0.685	0.742

电磁吸力的测量装置如图8b所示,由电压控制器给被测电磁元件施加电压(23V)。通电时,在电磁吸力的作用下,衔铁拖动青铜板上的砝码向吸合方向移动,最终吸合。实验结果为:衔铁拖动的最大砝码值是318 g。青铜与钢之间的摩擦系数是  $f=0.15$ ,那么,实际的电磁吸力为

$$F_{y\text{实}} = 0.318 \times 9.8 \times 0.15 = 0.467 \text{ (N)}$$

实验结果与理论计算值相比较可以看出:平均张合量的实测值(0.719 mm)与理论值(0.721 mm)接近;电磁吸力的实测值0.467(N),理论计算值0.638(N)相差26.8%,且  $F_{y\text{理}} > F_{y\text{实}}$ ;实验中,这个夹持器模型能夹持20 g重的物体。

试验中还将这个夹持器模型安装在自制的电磁磁式微小行走机构(外形尺寸  $7 \times 8 \times 11 \text{ mm}^3$ )之上,行走机构由XD5型低频发生器控制,使其可在直线轨道上行走,实现夹持——行走——停下——松开这一完整的搬运动作。

## 5 结 束 语

电磁驱动式微小夹持器能获得较大范围的开口张合量,从这一点来说它优于压电晶体驱动式微小夹持器。但是,电磁驱动元件的大小决定着夹持器的总体积。其结构相对比较复杂,装配要求较高。

电磁驱动式微小夹持器的研制,为我们今后设计和研制其它种类的微小机械积累了经验。但在测量控制技术、加工装配以及造型等方面还有待于进一步的改善。我们将继续探索尺寸更小、测控精度更高的微小机械,为微小机械早日走出实验室服务于生产而不懈地努力。

电磁驱动式微小夹持器的研制以及本文的编写,是在我尊敬的导师孙麟治教授的指导帮助下完成的。在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 陈建宇、茅元新、孙麟治,微小机械的研究现状和动向. 光学精密工程, 1994, 2 (6), 1-5
- [2] Sun Linzhi, Chen Jianyu, Sun Ping, The Design of Milli-grippers Piezoelectric Actuator as well as Electro-Magnetic Force. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, 1995: 199-204
- [3] 王玉龄主编,电磁电器设计基础. 北京:国防工业出版社, 1989: 117-119
- [4] 中国纺织大学机械手册编写组编,机械设计与制造简明手册. 上海:同济大学出版社, 1992: 416-419

## Design of Milli-gripper Using Electro-magnetic Force

Sun Ping Sun Linzhi

(Department of Fine Mechanical Engineering,  
Shanghai University, Shanghai 201800)

### Abstract

This paper presents the developing status of the integrated milli-gripper. In this paper the design of structure and its important parts of the milli-gripper using electro-magnetic force and wedgeshaped mechanism are introduced. The experiment of the prototype shows good behavior for this milli-mechanism.

**Key words:** Millimachine, Electro-magnetic driving, Gripper

孙 萍 女,上海大学硕士,研究领域:精密仪器及机械,微小机械。