

微机械研究新进展

孙麟治

(上海大学精密机械工程系, 上海 201800)

摘要 介绍了近三五年内国际上微机械研究的新进展, 阐述新的微加工技术, 趋向于探讨高纵横比的真三维立体结构; 适用于聚合物和金属材料的制造方法; 报道了压电型和电磁型微小电机的研制水平以及一些初见成效的微机械作品。认为国外正在进行多途径的研究, 并为努力攻克微机械固有的特殊技术难点而在不懈奋斗之中。

关键词: 微机械; 微加工; 机器人

微机械在美国称为MEMS, 起源于八十年代, 当时硅材料集成电路工艺渐趋成熟, 1988年加州大学贝克来分校首先研制成功 $\Phi 60\ \mu\text{m}$ 的静电马达, 随后MIT也制成 $\Phi 100\ \mu\text{m}$ 静电马达, 世界为之轰动。人们预测将来可以在微细外科手术、人体血管和脑病诊断、工业细管道微裂缝维修以及军事侦察等领域具有广泛应用前景, 一时成为热门研究课题。

今就作者去年参加第6届国际微机械和人文科学会议及其它所闻所见对微机械研究进展作一报道。

1 微加工

微加工是微机械研究发展的重要一环, 八十年代国内外做出的静电微电机、蜗轮机、传感器都是在IC工艺基础上发展起来的, 这种表面微加工仅仅适用于硅材料, 限于平面结构, 厚度很薄, 限制了应用范围。后来, 德国核能研究所用X光辐射光刻创立了LIGA工艺, 做出了高纵横比的金属齿轮, 是对微加工技术的一大推动, 但从众多国外著名学者参加的MHS 95国际微机械学术会议来看, 近年来已经在各个方面做了许多开拓工作。重点在于探讨制造高纵横比的立体结构, 适用于聚合物和金属材料的制造方法。包括: 容积硅微加工、金属电镀、立体电沉积、IH工艺、超微细放电加工、微细线切割、激光加工和精密加工等。

传统的容积硅微加工,采用湿式腐蚀剂,在容积硅片上形成各种微机械结构,但有集向性、死域、形状有限,元件之间活动度少等缺点。近年来改成干式微加工后^[1],可以得到真三维微机构,制造几十微米厚的零件。

表面微加工在过去年代里制成了多晶硅基的微传感器和致动器。近年来发展了将容积微加工和表面微加工复合在一起的设备,可用于制造复杂的微结构系统。由此制造的一种立体梳状致动器,施加静电电压后,多晶硅微结构可以在沟槽内上下活动。

将表面微加工和金属电镀工艺复合起来,可以获得较大纵横比的微机构,这就是德国开发的 LIGA 工艺。该工艺的最大特征是可以获得几百微米厚的微结构,和在晶片顶面形成微机械零件。近年来一些研究人员正在努力开发一种采用 on-chip Circuitry 将传感器与致动器集成的工艺^[1],制成一种谐振环状陀螺(图 1)。谐振环是在标准光刻设备上,通过光刻胶模板镀镍制成,镍环支承在含有 CMOS 电路的硅片上,环内的谐振片有变化时,陀螺因谐振而回转。

传统的电化学沉积用于电镀和充填模型称为电成形。采用定位电沉积可以制造三维结构^[2],如柱状物件和螺旋弹簧。装置原理见图 2。电极位于基板附近,对基板与电极施加电压时,溶液内形成的电场,使基板上生成沉积物。采用氨基磺酸盐溶液时,受计算机控制的步进电机带动铂丝电极作三维运动,基板上沉积出 $\varphi 1\text{ mm}$ 的镍螺旋弹簧。该工艺的成本低,适用于很多金属、合金、聚合物和半导体材料,可形成真三维结构。

Fig 1 Ring gyroscope fabricated from electroplated nickel

Fig 2 Schematic diagram of localized electroposition

日本还提出一项 IH 工艺^[3],即集成聚合物固化立体光刻。原理是应用了紫外聚合物在紫外光照射下产生的固化现象。即是在计算机控制下,先是通过固化作用形成二维片状聚合物单元,再将这些二维片状单元堆装而成为形状复杂的三维结构。金属三维结构是由前一步的聚合物工艺,结合金属铸造工艺完成。现已制成方形截面聚合物弯管、三通管、螺旋弹簧、聚合物单通阀、三维镍构件。该工艺无须掩膜、高纵横比、加工周期短、可加工三维立体聚合物和金属材料。

激光加工也被人们重视,名古屋大学用直接聚焦光束,刻蚀液相光聚合物表面^[6],经过照射过的部分被固化,制成了 $Z = 8$ 的微形聚合物齿轮。

日本 NTT 公司在图 3 所示的 LAE 装置上,以 YAG 激光辅助化学腐蚀法^[7],将陶瓷和单晶硅制造各种复杂形状三维结构。

近年来,国外对毫米级尺寸的微小机械也很重视,尤其日本。松下生产技术研究所已生产出二种型号超微细加工机,用于加工 $\varnothing 5 \mu\text{m}$ 深孔和轴,可在 $50 \mu\text{m}$ 厚不锈钢板上加工 $\varnothing 30 \mu\text{m}$ 孔,制成 $\varnothing 300 \mu\text{m}$ 不锈钢内齿轮, $Z = 9, B = 100 \mu\text{m}$ 。日本 TPC 公司也有同类型加工机产品,采用 NC 控制加工 $\varnothing 10 \mu\text{m}$ 、深 $50 \mu\text{m}$ 的孔。

日立公司下属二个研究所对微小齿轮制造有特色,分别采用微细线切割法,用 $\varnothing 10 \mu\text{m}$ 细丝电极制成 $m = 0.024, Z = 11, da = 0.3 \text{ mm}, \alpha = 20^\circ$ 和 $m = 0.024, Z = 9, da = 0.28 \text{ mm}, B = 0.3$ 二种渐开线齿轮^{[4], [5]}。

人们也没有放弃传统精密加工制造微机械零件,日本小笠原制作所,用特殊的超小型滚刀,制成了 $m = 0.01, Z = 100$ 的铜轴齿轮,为批量生产提供了条件。通过这些创造性的研究,相信今后将会制成许多复杂实用的微机械零件。

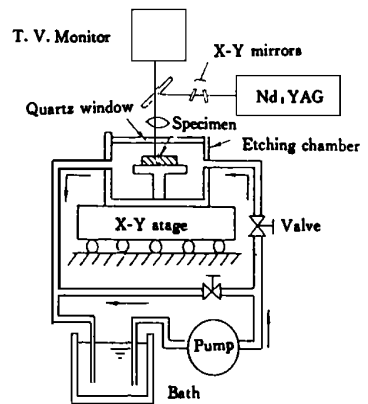


Fig 3 Construction of LAE apparatus

2 关于微小电机

目前主要有三类。

(1) 静电型电机是 1992 年前的研究热点,主要以 IC 工艺为基础。表 1 列出了国内外有代表性的几种静电电机,主要问题是力矩极小、寿命短。但据瑞士 Rooij 教授介绍,有一种装在手表中的静电摇摆电机,转子直径 1 mm ,是在光刻胶膜内电镀镍制成,衬套和轴做在硅片上,定子电极由多晶硅沉积在基板上再用氧化物和氮化物绝缘而成。电机的特点是通过枢轴能将力矩传递到从动机构。输出功率约 1 mW 微瓦。80 V 电压加到电机上时,转子转速为 2.7 rpm 。

(2) 压电型微电机又称超声波电机,主要在于压电效应作用。压电元件在电压作用下,产生机械扭振,通过摩擦转变为驱动转子回转。这种电机的尺寸小、力矩大、无磁、高响应、静转矩大和定位分辨率高等优点。日本精工仪器公司^[8]开发的超声波电机 $\varnothing 10 \text{ mm}$,无载转速 6000 rpm ,启动力矩 $1 \text{ gf} \cdot \text{cm}$,安装在轮式车内应用。

近年来还有人尝试着用硅片微加工制作微小超声波电机^[9]。

(3) 电磁型电机从九十年代开始提出了应用电磁作用原理制作微小电机的报道,国外成果见表 1。

东芝公司制成二种超小型电磁型电机,一种是径向电机直径 $\varnothing 3$,长 5 mm ,输出功率 98 mW ,另一种轴向电机 $\varnothing 0.8$,长 1.2 mm ,转速 $60 \sim 1000 \text{ rpm}$ 。

Tab 1 Character comparison between electrostatic micromotor and electro-magnetic micromotor

character		dia of rotor	outline dimension	rpm	Torque*	amp/volt
electro- static type	California Uni Berkeley		120 μm	150 (120K ⁺)		200V
	M IT		100 μm	> 1000		
	Gem any	190 μm			100 nkm	100V
	Q inghua Uni	120 μm		12000		100V
	Shanghai Institute of Metallurgy	100 μm	0.9 mm	0.001~ 20	100 nNm	20V
electro- magnetic type	W isconsin Uni	100 μm	~ 2 mm	15000	100 nNm	600 mA
		436 μm	4.5 mm	12000	—	600 mA
	Georgia	500 μm	1.5 mm	500	1.2 μNm	500 mA
	Gem any	1.4 mm	6 mm	200	116 nNm	500 mA
	Toshiba		$\varnothing 3 \times 5 \text{ mm}$		98 mW	
	Jiaotong Uni	$\varnothing 0.8 \text{ mm}$	$\varnothing 0.8 \times 1.2 \text{ mm}$	60~ 1000		
		$\varnothing 2 \text{ mm}$	2 mm	500	1.5 μNm	120 mA

我国上海交大也研制成功了这类电磁型电机,电机外形尺寸 2 mm 直流无刷,电流 120 mA 时,转子转速为 500 rpm。通过开关可正常换向,用电位器无级变速。电机的转子由永磁铁制成,定子绕组的制作采用投影光刻工艺。电机的转矩达 1.5 μNm 。

3 微机构和微机器人

3.1 平面移动机器人

国外目前研制出的移动机器人实际是一些移动小车。最具有代表的是日本精工 EPSON 公司研制的光诱导自行走机器人^[10],装有光学传感器、二只单相步进电机、减速轮系、以及充电式电容器的 CPU-IC 控制器等共计 97 个零部件,组成一个机电光综合体。机器人的外形尺寸小于 1 cm³,移动速度 1.4~ 11.3 mm/s,爬坡能力 30°,重量 1.5 g,充电 30 s 后可行走时间 5 min。

另外,如名古屋大学研制的 P- MARS 可编程自行走机器人系统,装有光学传感器和红外通信功能(采用步进电机驱动),左右装有二只电机,机器人可以前后移动和左右回转。外形尺寸 20 × 20 × 20 (mm³)。

有线操纵的移动机器人名目繁多,除了轮式以外还有覆带式、斜毛足行走小车。驱动器为电磁式微电机、超声波电机、电磁铁、压电元件以及形状记忆合金等。

东芝公司的 TO SUMO - Kun2 微型移动车^[11], 由前后二只超小型电磁式电机驱动 4 只轮子(图 4), 实现前进、后退、左转和右转。电机直径 $\varnothing 3.8$ mm, 机器人外形 10 mm, 重 2 g, 变频控制速度可达 300 mm/s, 爬坡能力 15°。

日本春秋二季举行的微机械登山竞赛, 参予者主要是这类有线控制的移动小车, 小车体积小、重量轻、惯性小, 而导线直径很细(0.05 mm), 操纵很困难, 但是由此推动着微机械研究工作的进展。

3.2 管道机械和管道机器人

这是微机械研究另一重要方向。东京工大研制的基于螺旋推动原理的管道机器人^[11-21], 可在 $\varnothing 25.4$ mm 弯管内爬行, 采用软轴驱动, 运动速度 260 mm/s, 管道弯曲半径 200 mm。

Nippondenso 公司针对核能厂和化工厂检查管道所需, 研制一种压电行走机器人, 形状如胶囊药丸, $\varnothing 5.5$, 长 20 mm, 重 1 g^[13], 可在 $\varnothing 8$ mm 直管和变曲管内行走。它由壳体、涡流传感器、移动机构和辐射器等四部分组成。金属波纹管壳体壁厚 60 μm , 涡流传感器用于探测管壁内的微裂缝。移动机构工作原理见图 5。包括三个 U 形弹性爪用于将移动机构支持在管壁内, 层叠 PZT 压电驱动器和惯性体。运动原理在于利用惯性力和最大静摩擦力之间的动力学关系。来自夹紧系统的摩擦力可以使机器人在管道内上下移动。移动速度 10 mm/s。

日本 OLYMPUS 公司研制了利用形状记忆合金 SMA 驱动的微型管道机械手^[14], 直径 1 mm, 长 80 mm, 五个活动度, 并为此而开发一种多功能柔性集成膜 MIF 厚 15 μm 内含加热器、传感器导线和电极, 贴附于 SMA 表面。机械手由位置反馈回路控制, 传感器提供控制信号。机械手顶端的定位精度 ± 1 mm。

3.3 微夹持器

微夹持器研究是实现机器人操作的重要环节。国外在这方面的研究报道不多, 东芝综合研究所采用柔性橡胶纤维管制成了直径 4 mm 的柔性抓手^[16], 改变管内通气方式可实现三自由度或多自由度活动, 完成一些简单功能操作。

日本 NIKON 公司中央研究室, 基于 Lorentz 电磁力和电热双晶片力作用原理, 研制了手指长度为 100 μm 的柔性微抓手^[16]图 6。手指由 SNX 柔性片和 Au 微线圈二种不同材料制成, 由于二者之间的热膨胀系数之差, 手指弯曲而产生夹持动作。施加 1 V 电压后, 该抓手的变形量为 210 μm (在空气中) 和 80 μm (在水中)。通过微机控制可以抓取聚苯乙烯小颗粒和海刺猬的卵, 并将其排列成 N 形。微手指采用微加工制成。

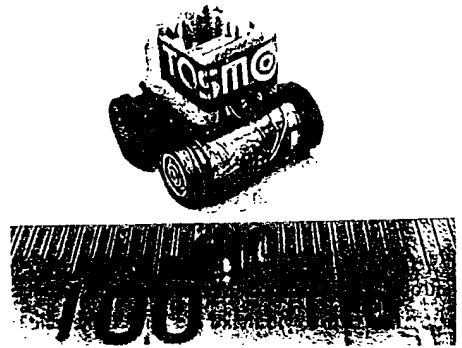


Fig 4 To sumo-kun 2 micro mobile machine

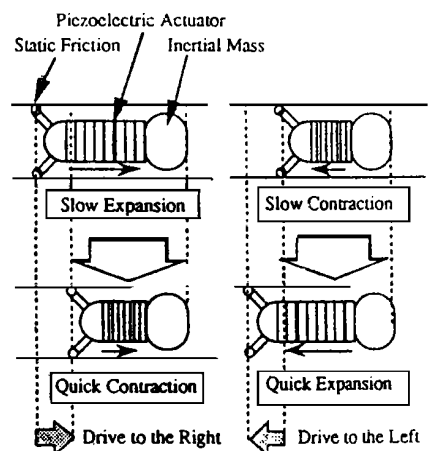


Fig 5 Principle of micro inspection machine

上海大学也已研制成开口量较大的蟹钳式微夹持器和由压电元件与弹性铰链组合的微小夹持器。

综上所述,微机械在国内外正在进行多方面、多途径的研究工作,不拘形式,集思广益,努力攻克微机械特有的微细加工、结构、惯性、摩擦、能源、驱动器以及控制等技术难点,为实现人类理想目的不懈奋斗之中。

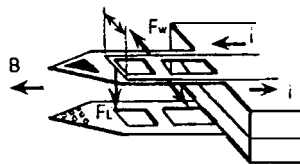


Fig 6 Schematic diagram of flexible microgripper

参 考 文 献

- [1][2][6][7][9][11][12][13][14] Proceedings of MHS' 95, Nagoya, 1995
 [3] 崔天宏等 IH 工艺在微机械中的应用 光学 精密工程, 1994, 2(6): 18~ 23
 [4] [5][10][15] Proceedings of First IFTOMM inter M icromechanism Symp. 1993 Tokyo
 [8] 光学精密工程, 1995, 3(3): 51~ 60
 [16] Suzuki Y. Flexible M icrogripper. Int J JSPE Prec Eng 1995, 29(1)

Recent Progress in M icro-machine

Sun Linzhi

(Department of Precision Mechanical Eng. Shanghai University 201800)

Abstract

The paper introduces the progress of international micro-machine research works in recent 3- 5 years, describes that the new micro-fabrication technology is trending to make three dimension cubic structure of high thick high-aspect ratio and to study fabrication method utilized to polymer or metal. The paper also presents the research situation of piezo-electro as well as electromagnetic motor and some micro-machine prototype or samples, it demonstrates that there are many investigation ways of micro-machine in approach abroad and much effort is in progress for overcoming inherent special technical difficults of micro-machine.

Key words: M icro-machine, M icro-fabrication, M icro-robot

孙麟治 男, 1928 年生。上海大学精密机械工程系教授。