

# 微电子机械系统的力学特性与尺度效应\*

## MECHANICAL PROPERTIES AND SCALING EFFECTS IN MICRO-ELECTRO-MECHANICAL SYSTEMS

梅涛<sup>1,2</sup> 孔德义<sup>2</sup> 张培强<sup>1</sup> 伍小平<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 力学与机械工程系, 合肥 230027)

(2. 中国科学院 合肥智能机械研究所, 合肥 230031)

MEI Tao<sup>1,2</sup> KONG Deyi<sup>2</sup> ZHANG Peiqiang<sup>1</sup> WU Xiaoping<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanics and Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

(2. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**摘要** 针对微电子机械系统(MEMS)材料的力学特性, 工艺过程对力学特性的影响以及微执行器、微机器人的尺度效应等力学问题进行了研究。从力学角度提出了硅和常用的薄膜材料作为 MEMS 结构材料时应遵循的设计和加工原则, 并系统地分析、归纳了静电、电磁、压电、形状记忆合金等各种微执行器的尺度效应特征。通过对机器蚂蚁、微型飞机、微型机器鱼等微机器人在微尺度下的动力学特性分析, 得到微机器人在尺寸越小时越容易被驱动结论, 为设计和制作微机器人等复杂微系统提供了理论依据。

**关键词** 微电子机械系统 硅材料 尺度效应 微执行器 微机器人 微机械

**Abstract** Mechanical properties of MEMS materials, the influence on mechanical properties by micromachining process, size effects on microactuators and microrobots were studied. Design and micromachining principles of silicon and thin films as MEMS structure material were proposed from mechanics' point of view. According to the minimum defect rule, MEMS structure should be as small as possible, and traditional machining process should be avoided. From the minimum stress rule, sharp angles should be avoided, and heat treatment should be applied. The maximum isolation rule indicated that hard cover films for contact surface were necessary in MEMS movable parts. Mechanical properties of thin films were closely related with the growing processes and the post treatment processes, therefore test structures were recommend for parameter determination.

Size effects of electrostatic, piezoelectric, electromagnetic and SMA actuators were analyzed and synthesized. The output forces of most actuators were proportional to  $L^2$  while the output forces of piezoelectric actuators were proportional to  $L^1$ , therefore micro piezoelectric actuators were the best actuators for MEMS. Dynamic properties of artificial ants, micro airplanes and artificial fishes in micro scales were studied. The required driving forces for artificial ants, micro airplanes, and artificial fishes were proportional to  $L^2$ ,  $L^3$ , and  $L^4$ . It is concluded that microrobots could be driven to creep, fly and swim when their sizes were small enough.

This work provided a theoretical base on design and fabrication of complex MEMS devices such as microrobots.

**Key words** Micro-electro-mechanical system; Silicon material; Size effect; Microactuator; Microrobot; Micromachine

Correspondent: MEI Tao, E-mail: tmei@mail. iim. ac. cn, Fax: +86-551-5592420

The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60075022 and No. 69985007).

Manuscript received 20010629, in revised form 20010830.

## 1 引言

微电子机械系统(micro-electro-mechanical system, 缩写 MEMS)概念于 80 年代末提出, 它一般泛指特征尺度在亚微米至毫米范围的装置, 目前各国对它的定义尚未完全统一<sup>[1]</sup>。美国 MCNC 对 MEMS 的定义是: 微电子机械系统是由电子和机械元件组成的集成化微器件或系统, 它是采用与集成电路兼容的大批量处理工艺制造的, 并且尺寸在微米到毫米之间。它将计算、传感与执行融合为一体, 从而改变了人类感知和控制自然世界的方式。日本微机械中心的定义是: 微机械

是由只有几个毫米大小的功能元件组成的, 它能够执行复杂、细微的任务。欧洲 NEXUS(The Network of Excellence in Multifunctional Microsystems)的定义是: 微结构产品具有微米级结构, 并具有由微结构形状提供的技术功能。微系统由多个微元件组成, 并作为一个完整的系统进行优化, 以提供一种或多种特定功能, 在许多场合包括微电子功能。

上述定义明显地与各国发展 MEMS 技术的特点、途径有密切关系。美国将与集成电路工艺兼容和集成化制造作为判定 MEMS 的主要条件, 这与美国主要发展硅微加工技术, 并在国际上保持领先地位有关。但

\* 20010629 收到初稿, 20010830 收到修改稿。本研究得到国家自然科学基金资助(60075022, 69985007)。

是,这一定义过于狭隘,将大量非硅材料与工艺制作的微系统排除在 MEMS 之外。日本研究 MEMS 的重点是超精密机械加工,它更多地是传统机械的微型化,因此对 MEMS 的定义是以微机械为主,而未对微电子功能作出明确要求。这显然与当前 MEMS 发展主流存在差距。在欧洲的定义中分为微结构和微系统两个概念,以包含采用 LIGA 技术制作的微型纯机械零件,缺乏对 MEMS 的统一定义。

我们认为 MEMS 应通过尺寸和功能来定义,而不应限定于任何制作工艺,因为工艺技术是不断发展和完善的。MEMS 器件并不能完全用总尺寸来定义,而应用特征尺寸来表征。特征尺寸是决定器件性质和加工工艺的关键尺寸,如静电马达的直径。特征尺寸在毫米级以上的机械电子系统基本上属于传统的机电一体化装置,传统的机械加工技术已经能够满足要求。而特征尺寸在亚微米以下的机械电子系统,由于纳米效应、量子效应的作用,其理论基础与加工技术已经完全改变,应属于最近几年来新提出来的纳电子机械系统(nano-electro-mechanical system, NEMS)的研究范畴。因此,我们认为 MEMS 应定义为:微电子机械系统是由特征尺寸在亚微米至毫米范围内的电子和机械元件组成的微器件或微系统,它将传感、处理与执行融为一体,以提供一种或多种特定功能。

由于 MEMS 的发展使人类的操作和感知能力拓展到纳米、微米空间,将使传统机械产生革命性的变化,近十几年来已经成为世界各国竞相研究的热点。我们于 1989 年开始进行 MEMS 研究,以微传感器、微机器人和 MEMS 力学量测量为重点,完成或承担了国家重点科技攻关、“863”计划、国家自然科学基金等近十项与 MEMS 有关的科研任务。采用各向异性腐蚀技术和 CMOS 集成电路技术研制成功硅阵列式三维触觉传感

器<sup>[2,3]</sup>,采用掺杂选择电化学腐蚀工艺研制成功微型双端固支硅梁<sup>[4]</sup>,采用表面微机械加工技术研制出了微型转速传感器<sup>[5]</sup>,采用半导体薄膜工艺和混合集成电路工艺制作出硅气敏阵列和混合集成气敏阵列<sup>[6]</sup>,采用铁磁橡胶材料制作出无线驱动微型游泳机器人<sup>[7]</sup>,并研究了微机械力学量测量方法<sup>[8]</sup>等等。

随着对 MEMS 研究的深入,不可避免地遇到了大量的力学问题,如“微机械尺度下材料的力学特性有何改变?”、“微加工过程对微结构的力学性能有何影响?”、“如何从力学角度来评价、选择和设计微执行器?”、对微型机械中涉及的材料、结构和流动的力学分析与实验检测已经成为 MEMS 研究的一个重要分支。由于 MEMS 尺寸微小,其流动特性和材料与结构的力学行为和物理性质与宏观法则有明显不同;当它受不同环境(湿、热、电、磁、力等)和不同加工过程的影响时,力学参数也会有明显变化。MEMS 表现出来的尺度效应、表面效应、隧道效应都远远超出宏观力学和物理规律范畴。迄今为止,宏观力学中的物理规律不能完全解释和指导 MEMS 设计、制造工艺、封装和应用中提出的问题,尤其是对其中很多重要问题还缺少有效的实验研究方法,有待于 MEMS 研究人员与力学研究人员共同进行深入的研究。

本文将针对作者在 MEMS 设计、制作中经常遇到的几个力学问题,分硅材料、薄膜材料、微执行器、微机器人等四方面研究材料特性和微尺度效应,归纳总结国内外目前已经掌握的数据与结论,探讨 MEMS 材料、结构、动力学设计原则与方法,为进一步的深入研究提供借鉴。

## 2 硅的力学特性

单晶硅是 MEMS 中最基本、最常用的材料,因此必

表 1 单晶硅与其他材料力学特性对比<sup>[9]</sup>

Tab.1 Mechanical properties of single crystal silicon and other materials<sup>[9]</sup>

	屈服强度 Yield strength N/m <sup>2</sup>	努普硬度 Knoop hardness N/m <sup>2</sup>	弹性模量 Young's modulus N/m <sup>2</sup>	密度 Density kg/m <sup>3</sup>	传热系数 Thermal conductivity W/m <sup>2</sup> ·°C	热膨胀系数 Thermal expansion 1/°C
* Si	7.0 × 10 <sup>9</sup>	8.3 × 10 <sup>9</sup>	1.9 × 10 <sup>11</sup>	2.3 × 10 <sup>3</sup>	157	2.33 × 10 <sup>6</sup>
* 铁 Iron	12.6 × 10 <sup>9</sup>	3.9 × 10 <sup>9</sup>	1.96 × 10 <sup>11</sup>	7.8 × 10 <sup>3</sup>	80.3	12 × 10 <sup>6</sup>
高强度钢 Steel(max. strength)	4.2 × 10 <sup>9</sup>	14.7 × 10 <sup>9</sup>	2.1 × 10 <sup>11</sup>	7.9 × 10 <sup>3</sup>	97	12 × 10 <sup>6</sup>
不锈钢 Stainless steel	2.1 × 10 <sup>9</sup>	6.5 × 10 <sup>9</sup>	2.0 × 10 <sup>11</sup>	7.9 × 10 <sup>3</sup>	32.9	17.3 × 10 <sup>6</sup>
W	4.0 × 10 <sup>9</sup>	4.8 × 10 <sup>9</sup>	4.1 × 10 <sup>11</sup>	19.3 × 10 <sup>3</sup>	178	4.5 × 10 <sup>6</sup>
Mo	2.1 × 10 <sup>9</sup>	2.7 × 10 <sup>9</sup>	3.43 × 10 <sup>11</sup>	10.3 × 10 <sup>3</sup>	138	5.0 × 10 <sup>6</sup>
Al	0.17 × 10 <sup>9</sup>	1.3 × 10 <sup>9</sup>	0.70 × 10 <sup>11</sup>	2.7 × 10 <sup>3</sup>	236	25 × 10 <sup>6</sup>
* SiC	21 × 10 <sup>9</sup>	24.3 × 10 <sup>9</sup>	7.0 × 10 <sup>11</sup>	3.2 × 10 <sup>3</sup>	350	3.3 × 10 <sup>6</sup>
* TiC	20 × 10 <sup>9</sup>	24.2 × 10 <sup>9</sup>	4.97 × 10 <sup>11</sup>	4.9 × 10 <sup>3</sup>	330	6.4 × 10 <sup>6</sup>
* Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.4 × 10 <sup>9</sup>	20.6 × 10 <sup>9</sup>	5.3 × 10 <sup>11</sup>	4.0 × 10 <sup>3</sup>	50	5.4 × 10 <sup>6</sup>
* Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	14 × 10 <sup>9</sup>	34.2 × 10 <sup>9</sup>	3.85 × 10 <sup>11</sup>	3.1 × 10 <sup>3</sup>	19	0.8 × 10 <sup>6</sup>
SiO <sub>2</sub> (光纤)	8.4 × 10 <sup>9</sup>	8.0 × 10 <sup>9</sup>	0.73 × 10 <sup>11</sup>	2.5 × 10 <sup>3</sup>	1.4	0.55 × 10 <sup>6</sup>
* 钻石 Diamond	53 × 10 <sup>9</sup>	68.6 × 10 <sup>9</sup>	10.35 × 10 <sup>11</sup>	3.5 × 10 <sup>3</sup>	2 000	1.0 × 10 <sup>6</sup>

\* 单晶材料 Single crystal

须首先对单晶硅的力学特性进行研究。表 1 为单晶硅与其他材料的基本力学参数对照表<sup>[9]</sup>。硅的屈服强度为  $7 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , 比不锈钢高三倍多, 是高强度钢的 1.7 倍。硅的努普硬度为  $8.3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , 比高硬度钢低一半, 比不锈钢高三分之一, 与石英 ( $\text{SiO}_2$ ) 接近。硅的弹性模量为  $1.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 与钢、铁、不锈钢接近。数据表明, 硅材料并不象通常所感觉的那样脆弱。分析产生这种感觉的原因, 可以发现以下几点。首先通常接触的是直径 50 ~ 130 mm、厚度仅 250 ~ 500  $\mu\text{m}$  的单晶硅片。这种圆薄片在受到外力时容易产生较大的内应力, 从而导致损坏。实际上, 相同尺寸的不锈钢片, 在同一外力作用下同样会被损坏。当硅片被分割成数毫米见方的小芯片时, 发生损坏的概率就大大减小了。其次, 由于单晶硅材料具有沿晶面解理的趋势, 当硅片边缘、表面和硅体内存在缺陷而导致应力集中, 并且其方向与解理面相同时, 会使硅片开裂、损坏。同时人们又在利用这一现象, 将硅片切割分离成一个个小芯片, 在这一工艺中不可避免地会有一些芯片上的缺陷导致不希望的芯片缺损。最后, 半导体的高温处理和多层膜淀积工艺会引入内应力, 当与硅材料本体、表面和边缘的缺陷结合时, 会导致应力集中, 甚至沿解理面开裂。人们认为硅强度低的另一个原因是硅被破坏时发生脆性断裂, 而金属材料通常是发生塑性变形。

因此硅材料制作的机械元件和器件的实际强度取决于它的几何形状、缺陷的数量和大小、晶向, 以及在生长、抛光、流片时产生和积累的内应力。当充分考虑到这些影响因素后, 将可能获得强度比高强度合金还好的硅微机械结构。合理使用硅材料和正确设计硅结构与加工工艺, 应遵循以下三个原则:

1) 缺陷最小原则 必须尽量降低硅材料在表面、边沿和本体中的晶体缺陷密度, 尽量减小结构尺寸, 以降低机械结构中晶体缺陷的总数。应当尽量减少或取消容易引起边沿和表面缺损的切割、磨削、划片和抛光等机械加工工艺, 采用腐蚀分离取代划片。如果传统的机械加工工艺是必不可少的, 则应将受到严重影响的表面和边沿腐蚀去除。

2) 应力最小原则 微结构中应尽量避免采用尖锐边角和其他容易产生应力集中的设计。由于各向异性腐蚀会产生尖锐的边角, 而导致应力集中, 因此在有些结构中可能需要进行后续的各向同性腐蚀或其他平滑锐角的工艺。由于材料的热膨胀系数不同, 高温生长和处理工艺将不可避免地引起热应力, 使微结构在严酷的力学条件下发生断裂, 因此必须采用退火工艺降低高温处理所带来的热应力。

3) 最大隔离原则 应采用  $\text{SiC}$  或  $\text{Si}_3\text{N}_4$  等坚硬、耐腐蚀的薄膜覆盖硅表面, 以防止硅本体与外界直接接触, 尤其是在高应力、高磨损的应用场合。在工艺条件

和结构特点不允许的情况下, 可以采用硅橡胶等绝缘柔性材料对非接触外表面进行保护。

### 3 薄膜材料的力学特性

薄膜材料在 MEMS 器件中必不可少, 尤其是在表面微加工器件中, 薄膜材料的力学特性对 MEMS 器件的设计和实现同样具有重要意义。例如, 当制作一组  $\text{SiO}_2$  薄膜悬臂梁时, 由于存在内应力, 会使悬臂梁发生翘曲 (图 1), 偏离原来设计的直梁形状。因此在设计 MEMS 器件时, 不仅要考虑弹性模量、泊松比等力学参数在 MEMS 中尺度的变化, 而且还应考虑内应力对结构形状和工作状态的影响。

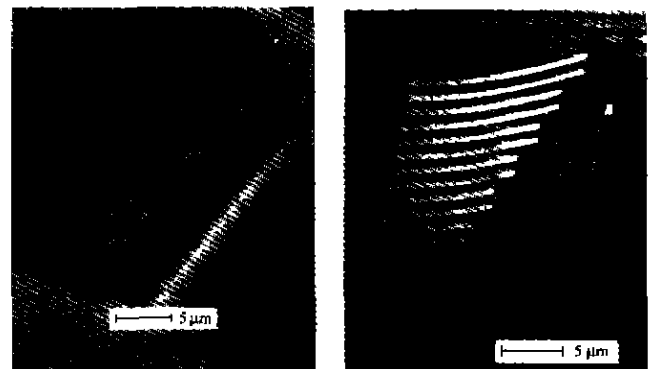


图 1 用于研究薄膜力学特性的微悬臂梁<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Microbeams for thin-film study<sup>[9]</sup>

材料力学参数主要包括密度、硬度、弹性模量、应力极限、应变极限、疲劳寿命、冲击韧度、品质因数等。而目前所能获得的微机械材料的力学特性存在以下问题, ①已获得的数据从品种、项目上都很不完全, 远远不能满足应用需要。②现有数据是在各自不同的工艺条件、试样尺寸和测试仪器下获得的, 缺乏通用性和权威性。③MEMS 的新材料、新工艺层出不穷, 目前缺乏一种快速响应机制来收集、确认新数据。

由于薄膜材料的力学特性与工艺过程密切相关, 因此通常根据实际工艺条件制作薄膜悬臂梁, 通过试验悬臂梁的力学行为得到薄膜的力学特性。图 1 中的悬臂梁结构被用于测量  $\text{SiO}_2$  等常用薄膜的弹性模量, 其结果见表 2<sup>[10]</sup>。从表中可以看出,  $\text{SiO}_2$  薄膜与体材料相比, 弹性模量的变化最大达到 31.4%。不同工艺制作的  $\text{SiO}_2$  薄膜之间弹性模量的变化更大, 溅射  $\text{SiO}_2$  薄膜的弹性模量是湿氧化  $\text{SiO}_2$  薄膜的 1.6 倍。对于 MEMS 器件的弹性模量、泊松比等基本力学参数测量, MEMS 材料的摩擦与磨损测量, MEMS 结构内应力和应变的测量, MEMS 结构固有频率与振动模态等动态参数的测量以及微机构运动速度的测量, 文献[8]中有详细介绍。

MEMS 薄膜材料工艺过程中的力学问题还包括薄膜附着力与脱落机理、多层膜之间的热匹配与热失效、

表 2 薄膜材料的特性<sup>[10]</sup>  
Tab.2 Material properties of thin film<sup>[10]</sup>

	薄膜厚度	薄膜密度	弹性模量	体材料弹性模量
	Thickness	Density	Young's modulus	Bulk Young's modulus
	Å	kg/m <sup>3</sup>	N/m <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>
SiO <sub>2</sub> (湿氧化) (thermal-wet)	4 250	2.2 × 10 <sup>3</sup>	0.57 × 10 <sup>11</sup>	0.7 × 10 <sup>11</sup>
SiO <sub>2</sub> (干氧化) (thermal-dry)	3 250	2.25 × 10 <sup>3</sup>	0.67 × 10 <sup>11</sup>	
SiO <sub>2</sub> (溅射) (sputtered)	4 000	2.2 × 10 <sup>3</sup>	0.92 × 10 <sup>11</sup>	
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (CVD)	3 500	3.1 × 10 <sup>3</sup>	1.3 × 10 <sup>11</sup>	1.5 × 10 <sup>11</sup> (单晶 3.85)
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (溅射) (sputtered)	2 900	3.1 × 10 <sup>3</sup>	1.3 × 10 <sup>11</sup>	
7059 glass (溅射) (sputtered)	4 200	2.25 × 10 <sup>3</sup>	0.52 × 10 <sup>11</sup>	0.6 × 10 <sup>11</sup>
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (溅射) (sputtered)	8 400	4.47 × 10 <sup>3</sup>	0.85 × 10 <sup>11</sup>	1.6 × 10 <sup>11</sup> (Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
α-SiCl <sub>4</sub> 辉光放电 (glow discharge)	8 800	~3.0 × 10 <sup>3</sup>	0.85 × 10 <sup>11</sup>	4.8 × 10 <sup>11</sup>
Cr (溅射) (sputtered)	—	7.2 × 10 <sup>3</sup>	1.8 × 10 <sup>11</sup>	2.8 × 10 <sup>11</sup>

微结构内部损伤与演化过程、应力集中和残余应力对微结构的影响等。它们与 MEMS 器件的成品率与可靠性紧密联系在一起,目前是通过大量的试验来摸索出最佳的工艺流程,然后通过严格的工艺参数控制来保证质量,缺乏系统的理论指导和规范的工艺分析程序。有待于通过工艺研究与力学研究的紧密结合,探索出微结构性能与工艺过程的关系,制定 MEMS 工艺设计规范。

#### 4 微执行器的尺度效应

传统机械做功往往是与体积力联系在一起的,动物爬行、飞行时要克服的也主要是重力、惯性力等体积力。然而在 MEMS 领域,表面力起主导作用。用特征尺寸  $L$  来表征物体的大小,该物体正好可以被包容在边长为  $L$  的正方体中。当特征尺寸  $L > 1$  mm 时,体积力起主导作用,这时要求的驱动力  $F \propto L^3$ 。当特征尺寸  $L \leq 1$  mm 时,表面力起主导作用,这时要求的驱动力  $F \propto L^2$ 。通常执行器所产生的驱动力都与  $L$  相关,当执行器的尺寸发生变化时驱动力也发生相应的变化。因此将首先研究微执行器的尺度效应,这对 MEMS 选择合适的微执行器具有指导意义。

微执行器通常采用静电、电磁、压电和形状记忆合金(SMA)等驱动原理。执行器的响应时间

$$t = \sqrt{\frac{2sm}{F}} \quad (1)$$

其中  $s$  为运动距离,  $m$  为质量,  $F$  为作用力。执行器的功率密度为

$$p = Fv/m \quad (2)$$

其中  $v$  为运动速度。

静电执行器电极之间的垂直静电力  $F_{\text{Esd}}$  和切向静电力  $F_{\text{Esa}}$  分别为<sup>[11]</sup>

$$F_{\text{Esd}} = \frac{\epsilon_0 abU^2}{2d^2} = \frac{1}{2} \epsilon_0 AE^2 \quad (3)$$

$$F_{\text{Esa}} = \frac{\epsilon_0 bU^2}{2d} = \frac{1}{2} \epsilon_0 b d E^2 \quad (4)$$

其中  $a$ 、 $b$  为电极的侧面尺寸,  $d$  为电极之间的间隙,  $U$  为间隙上的电压,  $E$  为间隙中的电场强度,  $\epsilon_0$  为介电常数。这些力的最大值由允许施加的最大电压决定。在宏观尺度时,常温、常压条件下的空气击穿电场强度为常数,约为 30 kV/cm。当尺寸变化时,驱动力将随  $L^2$  变化,响应时间与功率密度分别与  $L$  和  $L^{-1}$  成正比。但是在 MEMS 尺度时,空气的击穿电压约为常数,因此由式(3)和(4)得到静电力为常数,而响应时间与功率密度分别与  $L^2$ 、 $L^{-4}$  成正比。

电磁执行器中铁芯的磁阻远远小于空气间隙,因此磁通密度

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l_a} \quad (5)$$

其中  $\mu_0$  为空气导磁率,  $N$  为线圈匝数,  $I$  为线圈电流,  $l_a$  为气隙。于是空气间隙中的磁感应强度与总电流  $NI$  成正比,与尺寸成反比。由于最大电流受温度限制,因此  $I$  与  $L$  成正比,所以  $B$  为常数,不随尺寸变化。

电磁执行器分为两大类,磁阻执行器和罗伦茨力执行器。磁阻执行器的垂直驱动力  $F_{\text{Esd}}$  和切向驱动力  $F_{\text{Esa}}$  分别为

$$F_{\text{Esd}} = \frac{abB^2}{2\mu_0} \quad (6)$$

$$F_{\text{Esa}} = \frac{bdB^2}{2\mu_0} \quad (7)$$

其中  $a$ 、 $b$  为磁极的侧面尺寸,  $d$  为磁极之间的间隙。由于在最大温度限制下  $B$  为常数,所以磁阻驱动力与  $L^2$  成正比。

对于罗伦茨力驱动器,驱动力矢量为

$$\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (8)$$

由于由永磁铁和线圈产生的磁场给出恒定的磁感应,而且电流与  $L$  成正比,因此驱动力与  $L^2$  成正比,响应时间与功率密度分别与  $L$  和  $L^{-1}$  成正比。

悬臂式双膜片压电执行器产生的驱动力  $F$  和位移  $s$  为<sup>[12]</sup>

$$F = \frac{3d_{31} E b h V}{4L} \quad (9)$$

$$s = \frac{3d_{31} L^3 V}{h^2} \quad (10)$$

其中  $d_{31}$  为压电系数,  $E$  为弹性模量,  $L$ 、 $b$ 、 $h$  分别为压电执行器的长、宽、高,  $V$  为驱动电压。因此驱动力与  $L$  成正比,运动距离不随  $L$  改变,做功能力与  $L$  成正

比。这一结果与参考文献[11]中认为的压电执行器驱动力与  $L^2$  成正比和运动距离与  $L$  成正比,有较大差别。由于参考文献[11]中并未给出具体的公式推算,我们认为对于悬臂式双膜片压电执行器方程(9)、(10)以及所推导出的结论是可信的。

为了优化压电驱动器性能,通常使压电驱动器工作在谐振状态,这时其固有频率、功率和功率密度分别与  $L$  有以下关系

$$f \propto \sqrt{\frac{k}{m}} \propto \sqrt{\frac{E/s}{m}} \propto L^{-1} \quad (11)$$

$$P = \frac{Fs}{t} \propto Fsf \propto L^0 \quad (12)$$

$$p = \frac{P}{m} \propto L^{-3} \quad (13)$$

SMA 是通过加温和降温来实现驱动的,通常被认为是一种响应时间较长的驱动器,但是在 MEMS 尺度下情况发生了有益的变化。SMA 的驱动力与  $L^2$  成正比,运动距离与  $L$  成正比,做功与  $L^3$  成正比。由于 SMA 的散热面积与  $L^2$  成正比,质量与  $L^3$  成正比,对流系数与  $L^{-1}$  成正比,则响应时间与  $L^2$  成正比。当尺寸减小时,SMA 的散热面积相对增加,热对流增强,使 SMA 执行器响应时间大大缩短,功率密度大幅提高。

表 3 给出各种微执行器的驱动力、响应时间和功率密度与尺寸的关系。从表中可以看出,通常微执行器的驱动力正比于  $L^2$ ,而体积力正比于  $L^3$ ,因此随着尺寸的减小,执行器将显得更加有力。这也解释了为什么蚂蚁能够举起比自己体积还大的重物。

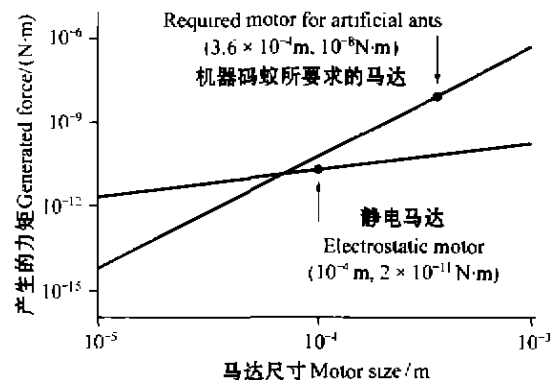
表 3 各种微执行器的尺度效应  
Tab.3 Scaling effects of microactuators

执行器类型 Actuation type	工作原理 Working principle	驱动力 Actuation force	响应时间 Response time	功率密度 Power density
形状记忆合金 SMA	热响应 Thermal response	$L^2$	$L^2$	$L^{-2}$
静电 Electrostatic	$E = C(\text{Normal})$	$L^2$	$L^1$	$L^{-1}$
	$V = C(\text{MEMS})$	$C$	$L^2$	$L^{-4}$
磁阻 Reluctance	$J \propto L^{-1}$	$L^2$	$L^1$	$L^{-1}$
永磁 Perm. Magnet	$J \propto L^{-1}, B = C$	$L^2$	$L^1$	$L^{-1}$
罗伦茨力 Lorentz-force	$J \propto L^{-1}$	$L^2$	$L^1$	$L^{-1}$
压电 Piezo	谐振 Resonance	$L^1$	$L^1$	$L^{-3}$

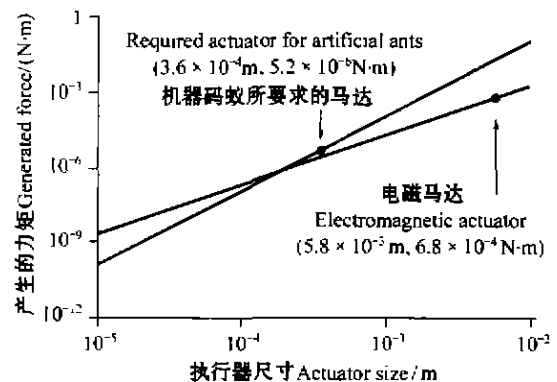
## 5 微机器人的尺度效应

采用微执行器可以模仿自然界的微小型生物,制作出各种微机械人,如机器蚂蚁、机器苍蝇、微型机器鱼等。在这些机械中实现爬行、飞行、游动所需要的驱动力与尺寸相关,同时微执行器所能产生的驱动力也与尺寸密切相关,因此微机器人的尺度效应分析十分必要。

日本的 Shimoyama 详细分析了机器蚂蚁的尺度效应<sup>[13]</sup>。一只真正的蚂蚁身长约为 3.6 mm,重量约为 1.6 mg,腿的直径约为 0.16 mm。近似地将蚂蚁身长的一半作为力臂,每条腿承受的最大重力按 1/3 体重计算,则每条蚂蚁腿所产生的驱动力矩约为  $1 \times 10^{-8} \text{ N}\cdot\text{m}$ 。因此,驱动与实际蚂蚁尺寸相当的机器蚂蚁所需要的最大力矩  $T_r$  约为  $10^{-8} \text{ N}\cdot\text{m}$ ,它与重力和力臂成正比,既  $T_r \propto L^4$ 。当采用静电马达作为机器蚂蚁的驱动器时,驱动力矩  $T_d \propto L$ 。当采用电磁马达作为机器蚂蚁的驱动器时,驱动力矩  $T_d \propto L^3$ 。由于蚂蚁腿的直径比蚂蚁身长小一个数量级,我们同样选取机器蚂蚁身长的 1/10 为驱动器的尺寸。由图 2 可以看出,只有当机器蚂蚁的身长(特征尺寸)降低到 1 mm 左右,这时微驱动器直径约为 0.1 mm 时,微执行器才有可能驱动机器蚂蚁爬行。



(a)用于机器蚂蚁的静电马达  
(a) Electrostatic motors for artificial ants



(b)用于机器蚂蚁的电磁马达  
(b) Electromagnetic motors for artificial ants

图 2 微驱动器与机器蚂蚁的尺度效应<sup>[13]</sup>

Fig.2 Scaling effects of microactuators and artificial ants<sup>[13]</sup>

微型飞行器(MAV)的发展带来了对空气动力学的新挑战,它们包括:①面临低雷诺数空气动力学研究领域的挑战。此时,机翼上的气流具有难以模拟的效应,如由层流分离引起的迟滞失速。②小飞行器低速飞行时层流起主导作用,能产生想象不到的相当大的力和力矩,这要采用全三维的空气动力学方法进行分析,与二维机翼相比,三维方法更缺少可用的数据。③气流

扰动,或者甚至是 MAV 本身的机动都会使 MAV 明显地受到不稳定气流影响,这时它的翼载很低,惯性几乎不存在。许多与 MAV 同样大小的自然飞行物通常采用另一种不稳定空气动力源,如拍打翅膀等,来产生升力和推力。MAV 最终或许也只能采取这种作法。

Shimoyama 同时对微型飞机的尺度效应也进行了分析。在微型飞机中围绕机翼的气流所产生的垂直升力

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (14)$$

其中  $C_D$  为升阻系数,为空气密度,  $U$  为空气相对机翼的速度,  $A$  为机翼面积。当飞机在空中飞行时升力应与重力相等,即

$$\frac{1}{2} C_D \rho^2 U A = mg \quad (15)$$

由于  $C_D$ 、 $\rho$ 、 $g$  均为常数,而  $A \propto L^2$ 、 $m \propto L^3$ ,所以  $U \propto L^{1/2}$ 。维持飞机在空中飞行所需要的功率

$$P = F_D U = \frac{1}{2} C_D \rho U^3 A \propto L^{7/2} \quad (16)$$

从前面讨论微执行器的讨论得知,静电、电磁、SMA 等微执行器的驱动力  $F \propto L^2$ 。微执行器的谐振周期  $T \propto L^{1/2}$ ,而振动速度  $U_R = L/T$ ,因此  $U_R \propto L^{1/2}$ 。微执行器的功率

$$P_R = F U_R \propto L^{5/2} \quad (17)$$

如果采用压电执行器,驱动力  $F \propto L$ ,功率

$$P_R' \propto L^{3/2} \quad (18)$$

比较式(16)、(17)和(18)可以看出,当  $L$  减小时微型飞机所需要的驱动功率的下降速度大于微驱动器输出功率的下降速度,因此在微尺寸下飞行更容易实现。压电执行器输出功率随尺寸下降的速度最小,因此是最适合的微执行器。

微机器人一般由若干对鳍来驱动,若鳍是由  $m$  段驱动器组成的,则该鳍的总推进力是各段推进力的总和。鳍对微型机器鱼的推进力可以由下式表示<sup>[4]</sup>

$$F = - \sum_{n=1}^m C_d \frac{\rho}{2} A_n |V_n| V_n \theta_n \quad (19)$$

其中  $C_d$  为阻力系数,  $\rho$  为水的密度,  $A_n$  为鳍的面积 ( $\propto L^2$ ),  $V_n$  为鳍的划动速度 ( $\propto L$ ),  $\theta_n$  为鳍与推进方向的夹角。因此机器人需要的推进力  $F \propto L^4$ 。对机器人的推进力即为执行器(鳍)所受到的阻力,所以随着微机器人尺寸的减小,微执行器所受到的阻力下降的速度,比微执行器的驱动力下降的速度快得多。因此尺寸越小,微型机器鱼越容易被驱动。

## 6 结束语

MEMS 力学问题在 MEMS 材料选择、结构设计和工艺制作全过程中均十分重要。通过上面分析与综合

得到以下结论:

1) 合理利用硅材料应遵循最小缺陷、最小应力和最大隔离三个原则,这样就有可能得到力学性能可以与高强度钢相比的硅结构。

2) 薄膜材料的力学性能与制作工艺密切相关,因此应该根据实际工艺制备试样,通过实际测试得到薄膜力学参数。

3) 静电、电磁和 SMA 微执行器的驱动力与  $L^2$  成正比,压电执行器的驱动力与  $L$  成正比,因此微执行器在微尺度下将显得更为有力。

4) 通过对机器蚂蚁、微型飞机、微型机器鱼等微机器人在微尺度下的动力学特性分析,结合微执行器的尺度效应特征,得到微机器人在尺寸越小时越容易被驱动结论,为设计和制作微机器人等复杂微系统提供理论依据。

本文仅根据目前所掌握的资料和数据,分析和总结了硅等部分 MEMS 材料的力学特性,以及静电、电磁、压电和 SMA 微执行器的尺度效应,更加广泛、全面的分析与总结有待于进一步的深入研究。

## References

- Petzold H C. Market analysis for micro systems 1996-2002. Berlin: NEXUS, 1998
- MEI Tao, Li Wen J, Ge Yu, et al. An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 80(2): 155 ~ 162.
- MEI Tao, GE Yu, NI Libin, et al. Study on multifunctional tactile sensing array. Hi-tech. Letter, 2000, 10: 53 ~ 56 (In Chinese) (梅涛, 戈瑜, 倪礼宾等. 多功能阵列式触觉传感器的研究. 高技术通讯, 2000, 10: 53 ~ 56).
- KONG Deyi, YU Chengduan, MEI Tao, et al. Electrochemical etching applied on fabrication of silicon resonant micro force sensors. World Electronic Devices, 2001, (2): 50 ~ 52 (In Chinese) (孔德义, 虞承端, 梅涛等. 电化学腐蚀技术在制作硅谐振式微力传感器中的应用. 世界电子元器件, 2001, (2): 50 ~ 52)
- LI Wen J, MEI Tao, Winston Sun. A micropoly silicon high-angular-rate sensor with off-chip wireless transmission. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 89(1-2): 56 ~ 63.
- YU Chengduan, MEI Tao, SHEN Fei, NI Lin. Research on intelligent gas sensors. Journal of Functional Material and Devices, 1996, 2(3): 187 ~ 193 (In Chinese) (虞承端, 梅涛, 申飞, 倪林. 智能气体传感器研究. 功能材料与器件学报, 1996, 2(3): 187 ~ 193).
- MEI Tao, CHEN Yong, KONG Deyi, LI Wen J. A microrobot driven by ferromagnetic polymer (FMP) actuators. 1st Korea-China Joint Workshop on Robotics, Pohang, Korea, May 2001. 19 ~ 21
- WANG Qimin, SHAN Baoxiang, LIAN Dongxia, ZHANG Peiqiang. Measurement of essential mechanical characteristics for MEMS and its components. Journal of Experimental Mechanics, 1997, 12(4): 487 ~ 499 (In Chinese) (王琪民, 单保祥, 连东侠, 张培强. 微电子机械系统中构件的基本力学量检测. 实验力学, 1997, 12(4): 487 ~ 499).
- Petersen K E. Silicon as a mechanical material. Proc IEEE, 1982, 70(5): 420 ~ 457.
- Petersen K E, Guarnieri C R. Young's modulus measurements of thin films

- using micromechanics. *J. Appl. Phys.*, 1979, 50: 6 761.
- 11 Peirs J, Reynaerts D, Brussel H V. Scale effects and thermal considerations for micro-actuators. *Proceeding of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998. 1 516 ~ 1 521.
  - 12 Tabid-Azar M. Microactuators, electrical, magnetic, thermal, optical, mechanical, chemical & smart structures. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 57 ~ 64.
  - 13 Shimoyama I. Scaling in microrobots. *Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Robots and Systems*, Pittsburgh, USA, August 1995. 208 ~ 211
  - 14 Fukuda T, Kawamoto A, Arai F, Matsuura H. Steering mechanism of underwater micro mobile robot. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atchu, Japan, May 1995. 363 ~ 368.

#### 作者简介

梅 涛,男,1962年11月生,江西省南城县人,汉族。中国科学技术大学力学与机械工程系,博士生,中国科学院合肥智能机械研究所研究员。研究方向为 MEMS、传感器、机器人,发表论文 48 篇,获得 4 项专利,获中国科学院科技进步三等奖。通讯地址:安徽省合肥市 1130 信箱,电话:0551-5591100,传真:0551-5592420, E-mail: tmei@mail.iim.ac.cn

MEO Tao, male, birthday: November 1962, birthplace: Nancheng, Jiangxi, China, Han nationality, Ph. D candidate of University of Science and Technology of China, research professor of Institute of Intelli-

gent Machines, Chinese Academy of Sciences, research domain: MEMS, sensors and robotics, 48 published papers, 4 patents, third grade prize for science and technology progress of Chinese Academy of Sciences. Post box: 1130, Hefei, Anhui, China, Tel: + 86-551-5591100, Fax: + 86-551-5592420, E-mail: tmei@mail.iim.ac.cn

孔德义,男,1966年12月生,安徽省铜陵市人,汉族。中国科学院合肥智能机械研究所副研究员,1999年9月东南大学微电子中心博士毕业,研究方向为微传感器及微型机器人,发表论文 14 篇。通讯地址:安徽省合肥市 1130 信箱,电话:0551-5593242, 传真:0551-5592420, E-mail: kongdy@mail.iim.ac.cn

张培强,男,1941年7月出生,北京市人,汉族。中国科学技术大学,博士生导师,教授。研究方向为固体力学、智能材料,发表论文 82 篇。通讯地址:安徽省合肥市中国科学技术大学力学与机械工程系, E-mail: pqzhang@ustc.edu.cn

伍小平,女,1938年2月生,天津市人。中国科学技术大学教授,博士生导师,工程科学学院院长,应用力学所所长。1997年当选为中国科学院院士。研究方向为实验力学、细观材料力学,发表论文百余篇,获中国科学院科技大会重大科技成果奖,中国科学院重大科技成果一等奖。通讯地址:安徽省合肥市中国科学技术大学力学与机械工程系, E-mail: xpwu@ustc.edu.cn