第12卷 第2期 石家庄铁道学院学报 Vol 12 No. 2
1999年6月 JOURNAL OF SHIJIAZHUANG RAILWAY INSTITUTE Jun. 1999

智能微系统力学中的几个问题

赵亚溥

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

【摘要】微电子机械系统(MEMS)和集成微电子机械系统(MEMS)近年来的蓬勃发展将为力学学科注入新的活力并为其提供难得的发展机遇。智能微系统力学是研究智能化微系统(包括MEMS、MEMS和MOEMS等)中所涉及到的力学问题,所研究的尺度一般在μm/Sub μm或以下,是微尺度力学和微电子学、物理学、自动控制、精密机械学、摩擦学等的交叉学科。从力学的角度综述了智能微系统力学的特点、所涉及的主要研究领域和目前的一些热门研究问题。

【关键词】MEMS 智能微系统力学 力学测试 CAD 流动控制

【分类号】O 33

1 前言

诺贝尔物理学奖获得者Feynman(费曼)教授于1959年,在美国的物理学会年会上,发表了著名的"There's Plenty of Room at the Bottom"的演讲,该文不但预示了制造微小器具技术的出现,而且文中的一些涉及微机械机理的观点至今仍是该领域的重要研究课题。Feynman教授还于1983年,在Chltech的"喷气推进实验室"做了题为"Infinitesimal Machinery"的报告。在报告中预示了多种新的技术:如用牺牲层方法制造硅微马达、静电致动的应用,并指出了微机械中摩擦和接触粘附的重要性等一系列重要问题。Feynman教授的上述两篇报告,不但被文献[1,2]重新全文刊登,而且还被国外近期的有关MEMS专著作为经典文献在篇首全文登载。在1988年,Fan、Tai和Muller报道了他们制造的头发丝直径大小(100μm量级)的静电驱动马达[3],该器件标志着微机械领域的开端[4]。Feynman教授的上述报告再一次生动说明,基础研究的"前瞻性"和"预见性"是何等的重要!

微电子机械系统(Micro-Electro-Mechanical Systems-MEMS)和微光学电子机械系统(Miceo-Opto-Electro-Mechanical Systems-MOEMS)十年来得到了蓬勃的发展,主要发达国家(美国、日本和欧洲)均斥巨资予以开发研究。美国自然科学基金会成立了先进微型机械中心,美国国防部是该领域主要的支持者。微机械市场前景十分诱人,据报道,到2000年,美国的微机械的市场份额将达到140亿美元。关于MEMS国际上目前尚无公认的定义,但一般是指整个构件大小从几mm到μm量级的微系统,有人也把1~10mm的小型机械和nm量级的分子机械也称为MEMS。MEMS的主要特点有:(1)体积小、重量轻、材料省、能耗低;(2)完整的MEMS一般是由微动力源,微致动器,微传感器组成,智能化程度高,集成度高;(3)整体惯性小,固有频率高,响应快,易于信号实时处理;(4)由于采用光刻、LIGA等新工艺,易于批量生产,成本低;(5)它可以达到人手难于达到的小空间和人类不能进入的高温、放射等恶劣环境,靠MEMS

收稿日期 1999-01-25 赵亚溥 男 1963年8月生 理学博士 研究员

* 受中国科学院"九五"重点项目——"MEMS力学检测"、中科院力学所所长择优基金和LNM室主任MEMS启动项目共同资助。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的自律能力和对微机械群的遥控,可以完成宏观机械难于完成的任务。

集成微电子机械系统(Integrated MEME- MEMS)是指将微机械和IC集成在一起的可以完成某种特定功能的系统。MEMS的诞生和发展,是新的高技术产业生长点,被认为将导致21世纪一场新的产业革命。

目前国际上微机械的研究主要有三条技术路线,即硅微加工技术、LIGA技术和精密加工技术。美国应用硅微加工技术,在微机械和微系统领域取得了影响比较大的有轰动效应的三项成果;即微静电马达、DMD数字微镜(DMD- Digital Microm irror Display)和ADXL 50加速度计。目前最为成功的集成微电子机械系统是美国TI公司生产的DMD数字微镜显示仪。DMD显示仪具有体积小、重量轻、功耗低、亮度大和色彩好等优点,已被用于大屏幕显示、微型投影仪和复印机投影系统,可以认为这是显示领域里的一场革命。在近年逐步引起人们重视的微光学电子机械系统(MOEMS)方面,美国亦取得了一些影响较大的成果。德国基于LIGA技术以及日本利用精密机械加工技术也取得了很多成果。成功经验表明,未来的微机械和微系统的发展之路是以硅微加工技术为主,辅之其它特殊技术。

微型机械技术之所以成为一种专门技术,是因为传统的机械制造技术在微尺度下的制作与操作基本完全失效。微机械技术不但能深入到以前未曾涉足的、利用微型转换元件进行传感和致动的领域,而且还迈进一个表面效应在许多现象中占主导地位的研究领域。智能微系统涉及到微电子学、精密机械学、力学、物理学、生物学、医学、化学等许多学科。它将必然为上述学科的发展注入新的活力,并提供了新的发展机遇。为方便,将上述领域所涉及到的力学问题统称为"智能微系统力学(Mechanics of Intelligent Microsystems)"。不难理解,智能微系统力学的研究尺度一般在$\mu m/10^{-1}\mu m$或以下;它还必然是一门交叉学科,涉及微尺度力学和微电子学、物理学、自动控制、精密机械学、摩擦学等学科。

2 国际上智能微系统力学若干方面工作

2.1 在动力学方面(主要是指在微米尺度下微系统的振动、传动等)

文献[5]指出,(1)关于微结构的精密动力学分析还没有试图开展。(2)还没有基本的设计原则。(3)实际上,还几乎没有帮助我们设计微机械系统的支持系统。

当描述微机构的动力学时,不同尺寸的微结构分别遵守如下规律:[5]

(1)宏观微机械,是指其尺寸$\geq 1\mu m$,可以用传统牛顿第二定律来描述其动力学行为

$$m\frac{dV}{dt} = -\beta V + K(t) \tag{1}$$

式中,β为粘性系数,$K(t)$为外力。

(2)介观微机械(或称为细观微机械),是指其尺寸$< 1\mu m$,$> 10nm$的微机械。此时,微构件的尺寸可以和布朗粒子(Brownian Particle)尺寸可比,其动力学方程为Langevin方程(即牛顿第二定律添加反映热激发随机力项)

$$m\frac{dV}{dt} = -\beta V + F(t) + K(t) \tag{2}$$

式中,F(t)为反映因布朗粒子碰撞而产生的随机力。

当考虑布朗粒子和靶粒子的碰撞间隔时,则可以用扩展的Langevin方程(ELE)来描述

(3)原子和分子机械,是指其尺寸$< 10nm$时,要用量子力学来描述。

振动性质的研究对MEMS中的微加速度计和微陀螺仪的性能至关重要。一般来说,当机构变小时,其共振频率提高。Yoshimi的研究表明:梳状微静电振子在空气中的Q-因子是真空中的1/1300,该结果说明,空气阻力对微构件的动力行为有着非常大的影响,这直接关系到微机械的动力学特性。微加速度计元件一般在空气中使用,由于构件尺寸微小,比表面积显著增大,因此开展该方面的研究,对于提高微构件的动力学性能意义十分明显。在比表面积很大时,如何对现有动力学理论进行修正,还是一个有待深入研究的问题。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在MEMS研究中, 原有的摩擦理论和研究方向已不适合处理微小构件间超轻载荷的微摩擦问题。如直径 100μm、厚度 10μm 微电机转子, 其质量< 1μg, 此时摩擦表面的摩擦力主要是由表面间分子、原子的相互作用。而非载荷的正压力所产生。因此微摩擦的研究也成为MEMS研究的前沿课题之一。

2.2　MEMS计算机辅助设计(MEMCAD)和MEMS数据库方面

MEMCAD 的出现, 使MEMS的设计、制造和封装等过程都可以进行虚拟模拟, 从而大大加快概念性设计和可靠性评估。而这部分工作的开展, 必须要有力学背景的人员的参与。目前国际上主要用于MEMS计算机辅助设计的商用软件有: 美国MIT 研制开发的MEMCAD 以及Microcosm 公司负责经销的IntelliCAD 和L-EDIT。瑞士 ISE 公司经销的SOLID IS(可进行热—电—磁—力等 2D 和 3D 模拟[6])。我国目前主要用H-Spice 等 IC 设计软件及ANSYS 等结构分析软件, 还没有专门的用于MEMS计算机辅助设计的软件。

目前, 建立MEMS材料数据库成为当务之急, 美国 Sandia 国家实验室、Berkeley 和MIT 等研究MEMS著名机构的网页上都将建立MEMS材料数据库作为当前所从事的MEMS研究主要工作之一。

2.3　MEMS材料及器件的力学性能检测

MEMS的力学检测有相当大的难度。由于质量小, 测量时要避免附加质量, 避免其刚度的改变; 由于尺度小, 要求加载时作用面积极小; 由于体积小而相对表面积大, 易受环境影响, 所以测试时对环境温度、振动等有较高要求; 用于MEMS测量的设备, 往往为非标准或价格昂贵。为此, 研究MEMS构件力学量测量的新实验技术(原理、加载方式、提取有关力学量的有效方法等), 提高测试精度, 降低测试成本, 成为开发MEMS的重要课题。MEMS测量方法多种多样, 但归结起来有如下特点[7]。

(1) 无损的细微加载技术。由于被测件十分微小, 无论静态加载或动态激励, 都必须考虑其破坏性, 要求尽量减小加载面积, 如真空加载、光热加载、电火花加载等。化静为动的实验方法, 来检测材料的物性、应力应变, 是典型的无损检测技术。

(2) 非接触式多媒体信息的提取技术, 对于质量极小的MEMS构件, 只有非接触测量才不会改变系统参数。因此往往需要把力学量转换成光、电、声、热等信号进行检测, 从而引出一些新的实验原理和技术。

(3) 显微观测技术。由于MEMS很小, 肉眼很难分辨, 多需要利用显微装置去进行观测, 一般用扫描电镜(SEM)、隧道显微镜(STM)和原子力显微镜(AFM)。

随着智能微系统加工技术的发展, 不可避免地带来了对于材料性质测试方法标准化的需求。美国MIT 机电工程和计算机科学系MEMCAD 组发展了一种集成的微电子机械"牵入"测试模式, 简称"M-Test"。该方法的原理是采用三种标准试样[8~10]: 悬臂梁(CBEAM)、双固支梁(FFBEAM)和固支圆形隔膜(DIAPHRAGM), 作为导体的上述结构经绝缘体置于基础平面(导体)上, 施加电压后, 由于静电吸引, 上面的梁或隔膜会在静电力的牵引下, 向基础平面方向发生弯曲变形, 当所施加的电压达到某一临界值时, 上述导电结构会"牵入"和基础平面相连, 该"牵入电压"可以和结构的几何量和内禀材料性质(如 E, $E/(1-v^2)$ 和残余应力)联系起来。

由于MEMS的成本大约至少 80% 来自于封装, 因此MEMS封装中出现的微尺度固体力学问题, 特别是微尺度下的失效机理的研究, 显得尤为重要。封装中所出现的主要问题是由于各层材料热学、力学等参数的失配所引起的残余应力, 高残余应力的存在会不可避免地引起翘曲、层裂、龟裂等失效, 大幅度地降低MEMS的可靠性。

μm 尺度下材料性质具有明显的尺寸效应, 而目前所总结出的所谓"尺度规律"(见附表 1), 还基本上是宏观定律的尺寸效应。精确测试 μm 尺度下材料的特性并建立数据库, 是进行MEMS设计的十分基础性的工作。因此, 该方面的工作得到了国际从事MEMS研究主要实验室的重视。而发展 μm 尺度下的测试装置和手段成为"瓶颈"。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 尺度规律小结表

物 理 量	尺度量级 L_n	服从规律	微型机构的典型指数 n
面积 S	2	$S \propto L^2$	$10^{-12}m^2$
力 F	2	$f \propto S$	$10^{-2}N \cdot m^{-2}$
强度 T	2	$T \propto f$	
拉应力 S_t	1	$S_t \propto S/L$	$10^6N \cdot m^{-1}$
剪切应力 S_h	1	$S_h \propto S_t \propto L$	
弯应力 B_{st}	1	$B_{st} \propto$ 半径$^4/L^3$	
变形 D_f	1	$D_f \propto f/S_t$	$10^{-8}m$
质量 m	3	$m \propto Q$ (体积)	$10^{-15}kg$
加速度 a	-1	$a \propto f/m$	$10^{-15}m \cdot s^{-1}$
频率 w	-1	$W \propto$ 声速$/L$	$10^{13}rad \cdot s^{-1}$
	-1	$W \propto \sqrt{S_t/m}$	
	-1	$W \propto v/L$	
时间 t	1	$t \propto 1/w$	
速度 v	0	$v \propto a \times t$	$10^3m \cdot s^{-1}$
功率 e	2	$e \propto f \times v$	$10^{-8}W$
功率密度 ed	-1	$ed \propto e/Q$	$10^{19}W \cdot m^{-3}$
剪切速度 (t)	-1	$t \propto v/L$ (厚度)	
粘滞应力 (V_{-st})	-1	$V_{-st} \propto t$	$10^6N \cdot m^{-2}$
摩擦力 (f_r)	2	$f_f \propto f$	
摩擦功率 (f_{r-e})	2	$f_{r-e} \propto f \times v$	
寿命 (t_{-we})	1	$t_{-we} \propto L$ /腐蚀速度	
热运动速度 (t_{-sp})	-1.5	$t_{-sp} \propto \sqrt{\text{热量}/m}$	$100m \cdot s^{-1}$
静电场 (E)	0		
电 $V)$	1	$V \propto E \propto L$	1V
静电力 (E_{-f})	2	$E_{-f} \propto S \propto E^2$	$10^{-12}N$
阻抗 (R)	-1	$R \propto L/S$	10W
欧姆性电流 (A_{-0})	2	$A_{-0} \propto V/R$	$10^{-8}A$
场发散电流 (A_{-f})	2	$A_{-f} \propto S$	
静电能量 (E_{-e})	3	$E_{-e} \propto Q \times E^2$	$10^{-21}J$
电容 (C)	1	$C \propto E_{-e}/V^3$	$10^{-20}F$
静电功率 (E_{-p})	2	$E_{-p} \propto E_{-f} \times v$	
静电功率密度 (E_{-pd})	-1	$E_{-pd} \propto E_{-p}/Q$	
阻抗功率密度 (R_{-pd})	0	$R_{-pd} \propto$ (电流密度)^2	
运动电流密度 (M_{-d})	-1	$M_{-d} \propto E \times w \propto$ (电位/s) $\times W$	
运动阻抗功率密度 (M_{-rd})	-2	$M_{-rd} \propto (M_{-d})^2$	
磁场 (M)	1	$M \propto A/L$ (距离)	$10^{-6}T$
磁力 (M_{-f})	4	$M_{-f} \propto S \times M^2$	$10^{-23}N$
磁场能量 (M_{-e})	5	$M_{-e} \propto Q \times M^2$	
电感 (I)	1	$I \propto M_{-e}/A^2$	$10^{-15}h$
电感时间常数 (t_{c-I})	2	$t_{c-I} \propto I/R$	$< 10^{-16}s$

注: 本表引自 *Drexier* 1992

2.4 MEMS 应用研究

MEMS 在 21 世纪将对世界各个方面产生巨大的影响。和力学领域相关的领域为MEMS 在流动控制以及在智能材料和智能结构中的应用。

将大量载有信号处理功能的传感器用于流动控制是一个重大转折。这类微系统能够实现实时分布式控制。因此交互式操纵湍流边界层中的各个高速脉线将成为可能, 从而可有效地降低表面摩擦阻力。希望

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过引入基于MEMS 的传感和控制策略, 开拓流动新现象研究的广阔前景。在生物医学研究领域, MEMS 技术已经绽露曙光。微沟槽和微喷口中的流动是所有生物医学应用中最常见的一类。对于牛顿流体在该类几何结构中的流动, 已经观察到大量难于预测的新现象, 这些现象对流体力学的基础提出了挑战; 微流动已经很清楚地为基础流体力学研究开拓了一个崭新的领域。

随着超级计算机速度的不断加快, 流体动力学家们正在逐步从只能预测湍流的效果发展到也能实际控制湍流。这类控制可以产生巨大的经济效益。在最近的一个研究项目中, 美国航空航天局兰里研究中心的研究人员证明, 在飞机机翼或机身表面放置一些纵的V 型槽(称为"小肋")可使粘性阻力降低 5%～6%。对于一般的运输机速度, 小肋必须放置得非常密集, 其间隔大约为 40μm, 类似于唱片声道, 较大的小肋一般会使阻力增大。

在湍流控制的研究中, 研究人员发现了前苏联研究人员对鲨鱼皮上一类称为"小齿"的齿状结构的研究成果。这些小齿和飞机机翼上要安装的小肋极为相似, 人们认为这是自然界对小肋概念的支持。最近, 湍流直接数值模拟揭示了小肋是通过防止旋涡进入离表面太近的地方(大约 50μm)来仰制涡旋的运动的。小肋把涡旋保持在这一微小的距离外, 就使涡旋无法把高速流体输运到表面近处。直接数值模拟最近的另一项激动人心的用途是用于研究主动式的湍流控制策略。利用这类技术, 可以使机翼表面根据流过其上的流体的湍流波动情况而发生轻微的运动。机翼的表面用合成材料制成, 其中有数以百万计的埋置传感器和执行装置, 它们根据流体压力和速度的变化而动作, 以控制引起湍流阻力的小涡流。就在 90 年代初, 将MEMS 应用于流动控制似乎还异想天开, 然而, 在美国空军的牵头下, MEMS 的进展已使这样一项方案发展到即将实现的地步[11]。运用MEMS 技术可制造出其上有必需的微传感器、控制逻辑和执行装置的集成电路。

参 考 文 献

1 Feynman R. There's plenty of room at the bottom. IEEE J. MEMS, 1992, 1(1): 60～66

2 Feynman R. Infinitesimal machinery. IEEE J. MEMS, 1993, 2(1): 4～14

3 Fan L S, Tai Y C, Muller R S. Ic-processed electrostatic micromotors. In: Tech Dig Int Electron Dev Meet (IEDM): 1988. 666～669

4 Ho C M, Tai Y C. Micro-Electro-Mechanical systems (MEMS) and fluid flows. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30: 579～612

5 Fujimasa I. Micromachines-A new in Mechanical Engineering. Oxford: Oxford University Press, 1996. 12～24

6 Funk J M, et al. SOLID IS: A tool for microactuator simulation in 3-D. IEEE J. MEMS, 1997(6): 70～82

7 王琪民等. 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

8 Osterberg P M. Electrostatically actuated microelectromechanical test structures for material property measurement: [dissertation]. Dept. of Electrical Engng and Computer Science, MIT. 1995.

9 Osterberg P M, Senturial S D. M-Test: A test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structrues. IEEE J. MEMS, 1997, 6(2), 107～18

10 Gupta R K. Electrostatic pull-in test structure design for in-situ mechanical property measurements of MEMS: [dissertation]. Dept. of Electrical Engng and Computer Science, 1997, MIT

11 Moin P, Kim J. Tackling turbulence with supercomputer. Scientific Americal, 1997, 276(1): 62～68

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Some Problems in Mechanics of Intelligent Microsystems

Zhao Yapu

(Research Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

【**Abstract**】The rapid development of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) and Integrated MEMS (MEMS) will inject new vitality and supply good opportunity for mechanics Mechanics of intelligent microsystems studies the mechanical problem in smart microsystems (including MEMS, MEMS, MOEMS etc.). The dimension is in the order of microns/sub-microns or below. It is a crossing discipline among micromechanics, microelectronics, plysics, automatic control, precise mechanism, tribology etc. From the poinf of view of mechanics, this paper briefly summarizes the characteristics, main research fields as well as popular research points in the mechanics of intelligent microsystems.

【**Key words**】MEMS mechanics of intelligent microsystems mechanical test CAD fluid control

(责任编辑 刘志春)

(上接第8页)

3 结论

系统地分析了机床主传动系统方案决策的优化设计, 从图论理论和矩阵理论着手, 建立了数学模型和优化方法。本文论述的方法和程序设计可用于各类机床变速箱传动方案的优化决策, 也可用于一般减速器传动方案的设计。

参 考 文 献

1 戴曙主编. 金属切削机床设计. 北京: 机械工业出版社, 1980. 20～40
2 洪炳容. 计算机辅助设计与制造. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1986. 74～85
3 陈立周. 机械优化设计. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 18～60

Optimum Design of Machine Tool Main Drive System

Li Hui[1)] **Liu Liping**[2)] **Zhang Peiliang**[3)]

(Department of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Railway Institute[1)], Shijiazhuang 050043
Automation Department, Hebei College of Technology[2)], Tangshan 063009
Hebei Supply and Marketing School[3)], Shijiazhuang 050051)

【**Abstract**】Based on the graphic theory, a new method of optimum design of machine tool main drive system is proposed. The corresponding mathematical model and optimum method are set up. This method and program can be used to design speed-changing gear-box of the machine tool main drive system.

【**Key word**】machine tool main drive CAD optimum design

(责任编辑 张士瑛)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net