

微型机械研究的现状及展望

Present State and Future of MEMS Research

王立鼎 崔天宏 吕琼莹

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

提要 微型机械是 80 年代后期崛起的新兴热点技术。本文从微型机械的历史背景入手阐述了目前微型机械的定义、主要组成部分、主要的工艺方法、国外的研究状况及应用前景,最后介绍微型机械在我国的发展状况。

随着微电子学的发展,本世纪八、九十年代大规模集成电路技术取得惊人的发展,由此带来的信息革命冲击着社会的各个角落。一些富于思考的科学家受微电子技术的启发,设想把机械系统做成象集成电路一样的集成机械系统,进而把传感器、执行器、微处理器以及光学系统等都集成于一个极小的几何空间内,并且也能象集成电路一样大批量廉价生产。如果这一设想得以实现,则势必带来空前的产业革命。

发达国家的决策者们支持了少数科学家这一近乎离奇的设想,开始了微型机械的研究。早在 60 年代中期,美国斯坦福大学就开始了微型机械的预研工作;80 年代逐步取得试验成果。到了 80 年代末期,美、日、德等国获得的成果把微型机械推向了新的高潮,相继报道了微型齿轮、曲柄、弹簧、铰链以及微型电机的研制成功。

一、微型机械的定义及主要组成部分

科学技术的发展使人类在探索宏观世界的同时,也在向微观世界进军。进入 20 世纪,空间技术、生物工程、信息科学、临床医学都得到了巨大发展。这些高技术在 21 世纪能否保持目前的发展势头,在一定程度上取决于微型机械的进展。

微型机械含义十分广泛,至今还没有一个权威性的定义。一个约定俗成的概念是指微型机械电子系统(Micro Electro—Mechanical System),简称为 MEMS。微型机械的尺寸大小在各国也没有统一的标准。不过,就定性来说,小到用传统机械加工方法难以制造的程度;就定量而言,整体器件一般在几

毫米以下,而其元件则在几百微米以下。日本东京工业大学的林辉教授做了以下三类划分:1~100 毫米称之为“小型机械”;10 微米~1 毫米称之为“微型机械”;10 纳米~10 微米称之为“亚微米机械”。一般统称为“微型机械”。

微型机械是一个独立的智能系统,主要由传感器、致动器(也称执行器)和微能源三大要素组成。这些要素技术的实现必须有相应的基础理论和工艺技术支持。从这个意义上说,微型机械是一个多学科、高技术的边缘学科。

以微电机为中心的致动器的研究一直是微型机械的核心研究内容,并在一定程度上是一个国家微型机械发展水平的重要标志。1988 年洛伯(T. A. Lober)和豪(Roger T. Howe)制作出了静电电机的原始结构,同年华裔留美学生冯龙生等人做出了首台可动的静电微电机,轰动了世界。从 1988 年到如今,人们对微电机的原理、工艺和材料进行了多次改进,设计、制作了多种型式的微电机,其性能有了很大提高,转子直径从最初的数百微米缩小至 50 微米,转速则提高到 10 万转/分。静电微电机有同步式、摇摆式、摇摆步进式三种。另外还制作出超声微电机、电磁微电机。其中,超声微电机在微型机械中是一个十分新颖和具有巨大潜力的待开发课题,它有可能成为微型机械系统中最有希望的动力元件之一。

微型泵和微型阀是微致动器的另一研究主流。两者可以集成于同一硅片上,组成微量流体集成控制系统。该系统在微电子技术、生物工程、临床医学等领域有着诸多的实际应用前景,并可望在近期取得实际效果。微型泵有步进式、电子栅极式、超声波

式等多种形式。微型阀有静电式、磁电式、热激励式、压电式和形状记忆合金式等多种类型。

微传感器作为微型机械的重要组成部分,是一门比较成熟的、发展历史较长的、具有相对独立性的分支学科。传感器按其功能可分为物理量传感器、化学量传感器和几何量传感器等诸多类型。总起来看,微传感器的发展方向是智能化,且尺寸不断减小,性能逐渐提高。例如,以往光学位移编码器的尺寸一般在数厘米量级,现在采用微加工技术制作的集成编码器的尺寸只有数十微米,分辨率可达0.01微米。由于采用集成化结构,缩小了尺寸,降低了成本,提高了可靠性。

微能源是专业性很强的独立单元技术。目前,薄膜光电池在厚度上已达微米量级,但用作具有高功率密度和高储能密度的单元微电池正在探索之中,并已取得很大的进展。

二、微型机械的主要加工工艺

微型机械特征尺寸微小是其基本特点,所以其制作难以采用常规方法实现。目前,微型机械的加工工艺有IC工艺、LIGA工艺、小机械工艺以及其他特种加工工艺。

IC工艺(集成电路制作工艺)是普遍采用的成熟制作手段。应用牺牲层蚀刻工艺,在硅片上通过淀积、光刻与蚀刻的巧妙结合,可以制成微型齿轮、马达等可动结构。例如,美国用IC工艺首先做出了超声微电机。最初的微型机械的结构都是通过IC工艺制作的。体硅的同向或异向蚀刻,在制作微泵部件、压力传感器等三维结构中得到较成功的应用。通过光刻、蚀刻制作的部件,可以利用硅硅键合、硅玻璃键合等组装成三维机械。但是,IC工艺属平面工艺,只适于加工硅材料,对于高深宽比的微结构和其他类型的材料制作便无能为力。所以IC工艺只能是微型机械加工工艺的起步。

LIGA工艺是德国卡尔鲁厄核研究中心研究出的一种微结构成形工艺。目前,光机电元器件日趋微型化和一体化,这就需要寻求一种能实现这种微型化的加工方法。在常规的微机械制作中主要靠硅技术,但由于硅结晶方向的限制,这种常规微结构制作仅限于平面结构。LIGA是德文Lithographie, Galvanoforming, Abformung的缩写,即包括三个工艺过程:深层同步辐射X射线光刻、电铸成形及铸塑。LIGA技术可进行三维任意横向几何形状微结构的制作,结构高度为数百微米,最小横向尺寸为1微米,结构纵横比很大,可以加工塑性材料、金属材料及陶瓷材料,或对这些材料的组合进行加工。LIGA技术制作的微结构较IC工艺有一个很大的飞跃,突破了平面工艺的限制,为微机械的发展

提供了新的技术手段,因而成为近年来三维结构制作的首选工艺。

小机械加工工艺,即超精密加工工艺,也是微型机械制作过程中常用的工艺技术。日本在这方面很有特色,最近东京大学工学部的一个研究小组开发了能够抓夹和切削1毫米以下微小物体的微型工具。小机械加工工艺是传统加工工艺向微观的发展,真正搞机械的人是能做到的,小机械加工工艺在IC工艺比较薄弱的地方有可能早期得到应用,所以它也是有发展前途的加工工艺方法。

除了以上三种加工工艺外,微型机械加工中还有其他的特种加工工艺。例如电火花、激光、电子束、离子束等加工也能加工出数十至数百微米的元件。日本采用微细放电加工技术已能作出直径2.3微米的针,冲出直径5微米的孔以及23微米内径的高精度微管。另外,日本人在一份微型机械调研报告中曾介绍了7种微加工技术。

LIGA工艺作为MEMS的新型加工领域,其微型化产品将大大改变MEMS的现状,使MEMS向实用化跨出一大步,它是微型机械加工中最有发展前途的工艺方法。这种工艺要求有高强度、高准直度的X射线光源,此种光源一般要通过同步辐射加速器得到,也有人正在探索经济型的小尺度的软X射线新光源。当然其他工艺方法也在MEMS加工中占有相应的位置。

三、微型机械在国外的研究状况和应用展望

微型机械作为一个崭新的研究领域出现于1987年前后,它的开发引起国际上的普遍重视。以美、日、德为先导正在大力开展基础研究与产品的开发,并进行国际间广泛的学术交流活动。如美国电子电气工程学会(IEEE)已建立了一个微机械电子产品工厂,举办了五次国际会议;四个国际组织(IOP、AIP、IEEE、ASNE)联合创办了《微型机械学与微型工程》杂志(季刊),增强这一领域的学术交流。另外,有关国际会议和博览会也常介绍微型机械的研究成果和产品。可以说,微型机械及其相关学科的研究已得到科技发达国家的普遍重视,并已成为当今高科技研究的热点技术。

美国是对微型机械进行研究并试制成功最早的国家。美国对微型机械的研究始于1965年,80年代后期引起普遍重视。1988年美国科学财团提供数百万美元的经费支持8所大学进行这方面的研究。美国国家科学基金会(NSF)于同年投入105万美元,1989年又投入200万美元,开始微型机械的主要项目研究。最近,美国国会已把微型机械列为21世纪重点发展的学科之一。

美国从事微型机械研究的单位很多,斯坦福大学、麻省理工学院、加利福尼亚大学伯克利分校、明尼苏达州立大学、国际商用机器公司、加州弗里蒙特新传感器制造公司、霍尼韦尔公司、IC—传感器制造公司、电话电报公司贝尔实验室、圣迪亚国家实验室等都正热衷于微型机械的研究,并取得了许多可喜的研究成果。其中,斯坦福大学是美国研究微型机械最早的单位。1965年接受斯坦福医学院的要求,开始利用硅片腐蚀方法制造脑电极阵列的探针,并取得成果。后来,又在扫描隧道显微镜、微型传感器等方面取得成功。加利福尼亚大学伯克利分校是美国微型机械与微细加工技术发展最快的单位。该校在静电微电机的研究方面处于领先地位,另外在微机构、微构件的研究方面也有很大进展。麻省理工学院在静电微电机的研制过程中取得新的成果,并从事亚微米的微观结构等方面的研究。其他许多单位在微机械领域也取得了相当的成果,并积极进行下一步的探索工作。

日本对微型机械的研究与开发给予了足够的重视,起步虽晚于美国,但进展相当快。1989年成立微型机械研究会,集中了日本学术界和产业界的半导体技术、医疗器械、精密机械和医学方面的研究人员进行开拓性的全面研究和开发。日本工业界和大学结合筹建一座新的“微型机器人”中心,政府给予大力支持,投资总额约3000万美元。1992年通产省正式启动一项为期10年,耗资约1.9亿美元的“微型机械研究计划”。日本在研制和开发微型机械的同时也注意广泛的学术交流,现在日本在微型机械的发展方向上形成两种观点,一种以东京工业大学的林辉教授为主,认为微型机械应走实用化的道路,即微型机械不要一味地追求微小,应注重其实用性;另一种观点则认为微型机械是对微观世界的探索,尤其应注重其尺寸的微型化。另外,在日本已举行了三次微型机械“爬山运动比赛”,以此来推动微型机械的发展。

日本从事微型机械研究的主要单位有东京大学、大阪府立大学、日本东北大学、日立制作所中央研究所、日本立石电机公司、日本横河电机公司等。还有其他一些单位从事这方面的研究,如东京大学专门成立了精密电子学和精密加工技术研究小组,专门对微型执行机构和超精密加工技术进行开发。该大学的生产技术研究所是日本研究与开发微型机械的主要单位,在微细工具与微细加工等许多方面取得了进展,例如实现了直径2.3~10微米的微孔加工,50微米的沟槽加工。又如日本东北大学工程系研制出控制微量流体流量的微型泵,此外还研制出两种流体无脉动的微型泵。其他单位在微型电机、微型传感器、微继电器、微机构等方面都已取得成果。

德国对微型机械的研究有自己的特色,可以说与美国、日本并驾齐驱。90年代初,前联邦德国研究技术部将微型机械系统工程列为新开发的重点项目,为之提供了4亿马克的经费。微型机械的研究与开发,现由德国工程师协会和德国电工协会下属精密工具技术委员会统一协调,组织全德的大学、研究所和企业,划分为五个大组进行研制。在德国已将微型机械列入大学的必修课程。德国已取得了令人瞩目的进展,他们创造了LIGA工艺,制成了悬臂梁执行机构,还利用电流体力学效应开发了微型液压泵。

德国从事微型机械研究的主要单位有慕尼黑夫琅霍费固体工艺研究所、卡尔斯鲁厄核研究中心微结构研究所、法兰克福的巴特勒研究所、巴登符腾堡的菲林根·施韦宁根微技术研究所、达尔姆施塔特大学电子声学系等。其中,慕尼黑夫琅霍费固体工艺研究所的主要研究成果有微型阀、微型振动传感器、微型泵等。该研究所在柏林设微结构技术研究部,它的集成传感器被列入联邦研究技术部的第一重大项目,已研制成功振动和加速度传感器,还有微型麦克风和温度与流量传感器用的各种微型结构元件。卡尔斯鲁厄核研究中心微结构研究所从事机械与电子学元件结合的研究,1990年制成世界上第一台微型涡轮机,其转子直径为0.1毫米。他们在微细加工工艺方面成功地创造了LIGA工艺,大量制造出至今用机械方法无法实现的微型机械器件,如加速度传感器和微型涡轮机,成本很低。此外,该所还制成同位素分离用的微型喷嘴、蜂窝状结构(壁厚4微米,高350微米)、镍六角棱柱(直径80微米)等微型元件。其他单位在立体微型结构、微型机械元件等方面都取得了一定的成果。

欧洲其他国家如瑞士、瑞典、荷兰等国都在积极从事微型机械的研究。他们在微加速度传感器、恒定流速微量致动器、微型泵等方面分别取得了一些成果并得到了实际应用。可以说微型机械作为一个新的研究领域已得到世界学术界和产业界的足够重视。

随着半导体集成电路技术等微细加工技术的发展和微致动方式的不断开发,微型机械在21世纪将会得到巨大的发展。微型机械集约了当今科学技术的尖端成果并涉及多种学科,有着广泛的应用领域和潜在的应用前景,并可能开辟新的产业市场。微型机械研究的总方向是将机构及其致动器、传感器、控制器、电源集成于一个微小空间,获得完备的机电一体化的微机械电子系统,并制成价格低廉、功能齐全的各种微型机器人,以进行微小空间高精度的作业和控制,广泛应用于国防、工业、农业、航天、军事、医学、航海、家庭服务等领域。

微型机械应用领域可具体划分为六个方面:生

物医学:细胞操作、利用可动的密封容器进行诊断或手术、精细外科手术;流体控制:微型阀、智能阀;微型光学:光纤、光扫描与调制、干涉仪;VLSI 制造:真空机械手、微定位、气体精密控制;信息仪器:磁头、打印机头、扫描器;下一代机器人:狭小空间(核电站、航天航空器)中的维修机器人、电缆维修机器人、自行走传感器。

微型机械及其元器件的应用具有巨大的价值。例如,微机械记忆单元和逻辑单元使用微型机械元件组成的微机械计算机,可以在未来空间开发、核技术等极端恶劣条件下正常工作。实验表明,这种机械式智能器件在状态设定后,即使断电也不会改变原有状态,具有极高的可靠性和稳定性。另外,美国犹他大学生物工程系用硅微加工技术制作了由100个微探针(直径0.08毫米、长1.5毫米)组成的脑电极阵列,并在动物身上做了试验。用该电极阵列可以检测电流,其未来的发展是可精确测量脑部信息,甚至可以用来使盲人复明。现在采用微机械技术已成功地实现了个体细胞间的融合。通过细胞融合技术可以人工设计和创造新物种,实用价值很大。微型机械有可能使生物学家操作和控制单一细胞,这将带来生物工程和医学科学的革命。此外,微型机械的发展,有可能制成微型手术刀和微型圆锯,用于精细手术,切除视网膜的伤疤组织。甚至可以使微型机器人进入人体,除去人体动脉里的胆固醇,探测并清除人体内的癌细胞。以上只是微型机械未来应用的几个方面。总之,微型机械的应用前景十分广阔,值得下大气力进行研究和探索,它的研究成功会使人类走向新的时代。

四、我国在微型机械方面的研究现状

我国对微型机械的研究也给予了相当的重视。

(上接第59页)

有关人员提供可靠的信息。同时,该系统可以促进国内信息的广泛交流与使用,还可以加强与国外的信息交流。

9. 加强生物多样性保护的国际合作

保护生物多样性是人类共同关心的问题,所以需要国际社会超越文化和意识形态等方面的差异,采取一致的行动。我国已经加入了《生物多样性公约》等世界上有关生物多样性保护的主要几个公约。我们应该在维护国家对生物资源拥有主权的前提下,依据公约的机制,结合我国的国情,有效地开展与国际组织的双边合作及多边合作,通过研究与开发或适度地向其它国家提供生物资源,获取一定

1988年国家自然科学基金委批准东南大学静电电机方面研究的基金申请,从此开始了微型机械某些领域的深入研究。现在国家已经提供200多万元人民币用于微型机械方面的起动和研究工作。中国科学院和国家自然科学基金委已为微型机械立项,有的已定为重点研究项目。目前,国家科委也正在考虑微型机械的立项问题。长春光学精密研究所成立了第一个微型机械工程研究室,最近清华大学成立了精密仪器系微机械与控制技术研究室。1990年12月,中国科学院在北京召开第一届微型机械研讨会。总之,我国已经展开微型机械的深入研究和学术交流。

目前,我国正在从事微型机械研究的单位主要有上海冶金所、清华大学、长春光学精密机械研究所等。这些单位取得的成果有小齿轮刻蚀、小气轮机、静电微电机、压电微电机等。其中,有的研究成果已达到世界先进水平。现在,我国正在进行微型机械工艺、结构、理论等方面的深入研究。在微型机械工艺方面,正在进行IC工艺、LIGA工艺、小机械零件工艺等的研究。在微结构方面,正在进行微流量排放系统的研究,主要在研制微型泵、微型阀。在微型机械理论方面,正在研究微结构的材料学、运动学、动力学和微摩擦学。另外就微型机械的静态、动态测试也在进行深入研究。总之,虽然目前我国在微型机械方面的投资、技术水平和经济发达国家相比差距还很大,但在微型机械方面的研究已形成自己的力量和技术方向,有望在微型机械研究的国际竞争中占有一席之地。(责任编辑 蔡德诚)

的补偿,争取资金和技术援助,共同分享惠益,促进我国和世界生物多样性保护工作的不断深入和广泛展开。

10. 为生物多样性保护建立可靠的财政机制

经费保证是生物多样性保护工作顺利开展的关键之一。应采取措施,将生物多样性保护所需各项资金纳入国家和地方财政预算、征收开发利用资源的补偿费,基本原则是“谁开发利用,谁出资保护”。在工程建设和开发活动中,注意生态的保护和恢复,落实保护生物多样性的措施和资金。同时争取国际援助、民间募捐、建立专门保护基金。

(责任编辑 蔡 今)