

微机电系统(MEMS)技术的研究与应用

高世桥¹ 曲大成²

(北京理工大学机电工程学院, 博士、教授、博士生导师¹; 信息科学技术学院, 博士²
北京 100081)

[摘要] 微机电系统是源于微电子加工技术, 融合了微机械制造、传感、致动及微控制于一体的系统。其特征尺寸极小, 学科交叉广泛; 技术研究包括微系统理论、设计建模、微机械加工、微器件集成等多个方面; 学科分类涵盖了机械、力学、光学、流体、电磁学、生物学等各领域, 在民品和军品领域有许多热点应用。本文介绍了微机电系统发展概况、微机电系统技术关键、微机电系统有关传感器, 以及微机电系统热点应用和微机电系统技术的发展前景。

[关键词] 微机电系统 MEMS 微机械加工 智能控制

[中图分类号] TH TP TM O3

一、微机电系统的发展

在自然界中, 人们对未知领域的物理研究越来越呈现出两级化的发展趋势。一方面是针对宇宙的极大化研究, 尺度特征为光年, 研究手段以射电望远镜为代表; 另一方面是针对原子、分子和电子等的极小化研究, 尺度特征为微米、纳米甚至皮米, 研究手段以扫描隧道显微镜为代表。这其中, 微型化是近二三十年自然科学和工程技术发展的一个重要趋势, 而微/纳米技术的研究则推动了这一领域的蓬勃发展。

微机电系统(Microelectromechanical Systems, 简称 MEMS) 是微/纳米技术研究的一个重要方向, 是继微电子技术之后在微尺度研究领域中的又一次革命。MEMS 是指将微结构的传感技术、致动技术和微电子控制技术集成于一体, 形成同时具有“传感-计算(控制)-执行”功能的智能微型装置或系统。MEMS 的加工尺寸在微米(μm)量级, 系统尺寸在毫米(mm)量级。它的学科交叉程度大, 其研究已延伸至机械、材料、光学、流体、化学、医学、生物等学科, 技术影响遍及包括各种传感器件、医疗、生物芯片、通信、机器人、能源、武器、航空航天等领域。MEMS 的发展源于集成电路, 但又与之有所区别; MEMS 能够感知物理世界中的各种信息, 并由计算单元对信息进行处理, 再通过执行器对环境实施作用与控制。微型化是 MEMS 的一个重要特点, 但不是唯一特点。首先, MEMS 不仅体积小、重量轻, 同时具有谐振频率和品质因子高(高 Q 值)、能量损失小等特点。其次, 可批量加工特点大大降低了 MEMS 产品成本; 若借助于 MEMS 器件库, MEMS 的设计将更加灵活, 重用率更高。最后, 强大的计算能力是 MEMS 系统实现信息采集、处理、控制的关键, 充分利用集成电路的计算优势将会拓展 MEMS 在智能控制等领域的应用。

美国物理学家 Richard Feynman 分别于 1959 年和 1983 年发表了“*There's Plenty of Room at the Bottom*”和“*Infinitesimal Machinery*”两篇文章, 科学地预见并描绘了微/纳米机械与控制的技术发展趋势。

自 20 世纪 80 年代起, MEMS 就引起了世界各国科学界、产业界和政府部门的高度重视, 成为发达国家高科技发展的重点方向之一, 其中美国、日本、德国 3 个国家的研究分别在美洲、亚洲和欧洲最具代表性。美国的研究多直接列入国防研制计划, 早期的研究经费来自国家基金会(NSF), 之后由以国防高级研究计划局(DARPA)为主的军事领域提供资助, 资助水平每年每个项目平均高达 5 000 万美元, 用于重点发展 MEMS 的国防应用。日本的研究以开发微型机器人为目标, 首期研发了医疗和核工业应用中的微型机器人, 并于 1991 年成立了微机电系统研究中心, 计划 10 年内投资 250 多亿日元发展 MEMS。德国更侧重于微机械加工技术, 并实现了多种具有前沿性的加工手段; 欧洲还成立了 NEXUS(Network of Excellence in Multifunctional Microsystems), 仅德国每年的 MEMS 投入就达 7 000 万美元。目前, 美国、德国和日本在 MEMS 的研究方面处于领先水平, 并已取得市场效益, 主要以加速度传感器、惯性测量器件、微流体系统为主导产品。此外, 东南亚地区如新加坡、韩国在 MEMS 研究中也取得一些成果。我国的 MEMS 研究始于 20 世纪 90 年代, 主要从事微机械动力学等基础理论的研究, 并在微电机、微马达、微惯性测量等方面取得了阶段性的成果。国家自然科学基金、“863”计划等对 MEMS 研究都给予了充分的重视和资助。

二、微机电系统关键技术

微机电系统的重要意义不仅在于能缩小体积、减轻成本, 作为一门交叉学科, 它的研究和开发更是为了在微观领域探索新原理、开发新功能、制造新器件。它已涵盖了从基础理论、建模设计、材料、加工工艺到传感控制、封装集成等各个技术领域, 近年来在这些领域都取得了不同程度的突破。

1. MEMS 基础理论、设计 MEMS 器件在设计、加工、制作中遇到的非经典物理问题是其基础理论研究的重点。当器件的结构尺寸缩小到微米量级时, 许多在宏观情况下可以忽略的物理现象都要重新予以考虑, 如微摩擦、微阻尼、微吸附力、微静

电等, 不仅不能忽略而且还将成为主要的因素, 因此需要从微能量传输的角度予以研究。MEMS 设计主要包括微结构及微系统建模设计与集成电路的混合设计等。目前 MEMS 通常的设计方法包括结构化设计、自顶向下设计、层次化设计等; 微器件建模是通过 CAD/ CAM 计算机辅助设计工具进行模拟仿真, 如器件级模拟、电路级模拟、系统级模拟; 建立标准的 MEMS 器件仿真库可以增强 MEMS 设计的可重用性和效率。

2. MEMS 材料和加工工艺 硅是 MEMS 使用的主要材料, 它不仅有良好的半导体特性, 而且有良好的机械特性。其他 MEMS 材料还有多孔硅、氮化硅、TiNi 形状记忆合金、压电材料、光敏材料等。硅微机械加工技术是制造 MEMS 微结构、传感器、执行器的主要方法。它是借助于一系列特殊的工艺, 按照一定的顺序来制作微器件的方法。微机械加工技术的发展, 还派生出了一系列技术分支, 如体微加工技术、表面微加工技术、LIGA 和准 LIGA 技术、熔接技术等。

(1) 体微加工技术 (Bulk Micromachining)。体微加工技术是制造微三维结构的一种方法。它按照预先设计的图形从基底 (硅片等材料) 开始, 通过有选择地不断移走不需要的部分制作出指定的微结构。体微加工技术的主体材料通常为单晶硅片, 而材料移走的关键技术是选择性化学蚀刻 (包括干法和湿法两类蚀刻) 方法。由于蚀刻液对硅片具有不同的蚀刻力, 故蚀刻方式又分为各向同性蚀刻和各向异性蚀刻。各向同性蚀刻是指蚀刻时蚀刻速率在各个方向上相同, 各向异性的蚀刻速率则取决于多方面因素。体微加工技术在 MEMS 加工技术中最为成熟, 并已广泛用于硅微加速度计、墨水喷嘴、微阀、悬臂、梁、弹簧、隔膜等微结构。

(2) 表面微加工技术 (Surface Micromachining)。表面微加工技术是在基底表面进行的, 基底材料可以是硅片、玻璃、铝等, 但基底只是作为衬底而不参与加工过程。表面微加工首先要进行薄膜的沉积和成型, 然后再通过有选择性的蚀刻来移走牺牲层, 保留余下的结构层。牺牲层是指在结构层下可以溶解的沉积薄膜, 通常是二氧化硅, 可用湿法进行蚀刻。牺牲层被蚀刻后, 留下无支撑的微结构。

(3) LIGA 和准 LIGA 技术。LIGA 源于德语 Lithographie Galvanoformung Anformung 首写字母的缩写, 它对器件的加工宽度为几微米, 深度可达 1 000 微米, 被认为是能够产生最佳高纵横比的微加工技术。原理上, LIGA 技术是应用 X 射线平板印刷术在一个导体基底上产生一个纵深模式, 然后从底材底部到阻件顶部之间对 X 射线受阻的其余空间实施电镀, 从而生成一个阻件模子的镜像复制品。LIGA 技术有 3 种主要工艺: X 光掩模板制造、X 光深度光刻技术和微电铸技术。X 光掩模板通常是所加工铸件的横截面, 例如微齿轮的横剖面, 它必须有选择地透过或阻挡 X 光。X 光深度光刻的深度可达数百微米, 它对铸模沿掩模板边界进行光刻。微电铸是将显影后的铸模空隙用电铸入各种金属, 最后除掉铸模后便可形成所要的铸件。目前, 利用 LIGA 技术可制造出微齿轮、微加速度传感器等。但是, 由于 X 射线成本昂贵, 因此 LIGA 技术并不普及, 但它在

一些要求非常精细的如空间分辨率和高深宽比等特殊场合中却十分有效。由于 X 射线源本身的稀有性及技术本身价格昂贵, 因此, 采用紫外光源的“准 LIGA 技术”得到了广泛的应用, 且适用于对垂直度和深度要求不高的微结构加工。

(4) 键合技术 (Wafer Bonding)。键合技术用于将上述工艺加工出的微结构通过键合制成微器件。键合技术又分为硅熔融键合和静电键合。硅熔融键合是借助粘合剂通过化学反应在相邻硅原子之间产生共价键形成键合, 静电键合是在静电作用下使紧密接触的界面在高温下发生化学反应形成化学键的键合。

3. MEMS 感知与执行技术 经过 MEMS 加工工艺制造出来的微构件、微器件可以组合成微传感器和微执行器。微传感技术直接影响信息的获取、精度、量程、稳定性等指标, MEMS 进行信息处理取决于传感信息的质量。根据测量性质, 微传感器可分为机械、声、光、电、磁、热、化学、生物等传感器, 发展趋势呈智能化、多功能、集成化趋势。微执行技术主要是开发与硅微加工材料和工艺相兼容的动作形式, 并在同一硅片上对动作形式提供能量并电气控制。微执行器是微系统的关键技术之一, 实现难度较大。现有的微执行方式包括静电、电磁、压电、超声、形状记忆合金、高分子凝胶、热和光执行等。由于存在执行力的尺寸效应问题, 静电力、热膨胀力的作用强于其它如电磁力的效果; 前者一般与尺寸的零次方或二次方成正比, 后者则与尺寸的高次方成正比。此外, 在微执行技术中, 还存在能量转换率、执行电压、集成与控制等问题。

4. 微组装、微封装、微集成、微测试技术 微组装技术到目前为止还被认为是比较难的或至今尚未很好解决的关键技术。对微机电系统而言, 虽然已有了一些微细加工的方法, 但如何把各个微小零件组装起来以构成一个完整的微机电系统, 还有待于进一步研究。目前主要的方法仍是将加工和组装一体化, 即从元器件到产品要经过微电子线路、微电子器件、MEMS、完整系统等 4 个层次的组装。在实际应用中, 诸如多自由度操作器、精密微位移工作台及吸附、装卡工具等, 均是微系统组装研究中的关键技术。组装之后需要对微机电系统封装, 微封装方法有真空封装、阻尼控制封装、多芯片封装、硅-玻璃的静电封接、硅-硅键合技术等, 这些也是 MEMS 的关键技术之一。微系统集成主要涉及微传感器、微执行器与控制单元的集成。目前, 多传感器系统、多层信息处理系统的发展使传感器、执行器和微电子接口有机地结合成新型的 MEMS 器件。微机电系统本身是微观的系统, 但是工作的环境、工作的目的并不总是微观的。因此, 无论是与宏观系统其它部件、其它功能芯片、其它性能部件的连结, 还是宏观上如何进行操作、控制、检测等, 都存在宏、微接口之间的控制问题。MEMS 器件的测试要比集成电路器件复杂得多, 后者通过加电的方式批量进行测试, 但 MEMS 器件不仅要测试电气性能, 而且还要测试在模拟各种物理环境下的振动、加速度、惯性等机械特性。测试内容包括材料性能测试、加工工艺参数测试、功能测试等。缺乏自动化的测试设备给批量测试也带来了很大的挑战。

三、MEMS 微传感器和微执行器

微机器人囊括了多种功能,而微传感器和微执行器本身也是一种微机电系统。当前,研究比较集中、成熟的微传感器和微执行器有如下各种。

1. 力学传感器与执行器 力学传感器和执行器是应用最为普遍的 MEMS 器件。它利用微结构的基本力学原理,通过各种方式来感知或产生应变、压电、压阻、电容、静电力等。微加速度计是利用弹性力学方法,通过测量已知质量和刚度的微结构变形来直接或间接度量加速度值的传感器件。微加速度计具有量程范围更宽、抗冲击性能强、成本更低、实现方式多样化等特点,已用于汽车安全气囊或心脏脉动探测等。微机械陀螺是另外一种根据科里奥利力(Coriolis)测量物体旋转速度和旋转角度的传感器。同宏观陀螺结构不同,微机械陀螺多采用内外框架形式的振动结构,它与微加速度计组合在一起形成微惯性测量组合(MIMU),可用于飞行器导航、车辆及摄像机的姿态控制等。其它力学传感和执行器件还包括力传感器、液体或气体压力传感器,用于麦克风上将说话气流转换成电能的传声器(气流不断变化的压力传感器)、机器人操作手上的触觉传感器,以及各种静电执行器、热膨胀执行器、机械谐振器、机械继电器和射频电路的机械 RF 开关等。

2. 光学传感器与执行器——MOEMS 微光机电系统 微光机电系统主要涉及微光学传感器、执行器以及微小光学结构等,是 MEMS 与光学相交融的技术。其基本原理是将微光学器件、光波导器件、半导体激光器、光电检测器件等集成在一起形成各种微小光学系统。MOEMS 传感器是用于探测光的各种传感器,如直接光电效应传感器、结型光电监测器、电荷耦合的电容式传感器、热电式光检测器等;MOEMS 执行器是用于光发射和光调制的器件,如各种形式的发光二极管、激光器、液晶显示和各种形式的光调制器。此外,微机械加工还可以得到各种 MOEMS 光学结构。异性腐蚀技术可腐蚀出光滑完美的晶体平面,其晶体面积小、精度高、反射效果好,可用于制造高分辨率投影显示器件。还有用于光通信的光传导器件、光栅器件,用于光谱分析的滤光器、分光仪等,这些都是目前 MOEMS 技术研究的热点。

3. 热传感器与执行器 热传感器和执行器的主要功能是测量或调节温度。热传感器是利用微机械加工器件根据不同的热传导形式对物体或环境的温度进行测量。这一领域的热传感器包括电阻随温度变化的薄膜热阻传感器、采用红外等光学形式的非接触式测温计、金属材料随温度线性膨胀的热-力传感器、微机械热电偶传感器等。热执行器包括各种由电能、机械能、化学能转换成热能的加热器,简单的如电阻器、加热丝可以应用于温度补偿,复杂的像通过微喷嘴控制的循环冷器。目前这方面的研究尚不成熟,吸引了众多研究者的注意力。此外,在与微流体领域相交叉的研究方面,热传感器与执行器的应用还包括热气体压力传感器、热流体

压力传感器等。

4. 微流体器件 微阀、泵、微管道、喷嘴等都属于微流体器件,是 MEMS 应用于微流体领域的研究热点。尽管目前对发生在微尺度范围内的微流体力学的规律还没完全认识,但 MEMS 在微流体力学领域将产生很多有价值的技术方向,如基于微机械加工的流动传感器、对流体黏度和密度进行测量的黏度/密度传感器,采用热膨胀、压电致动、静电致动等方式来控制流体流动的微阀等。

5. 电磁传感器与执行器 微机械磁传感器的基本原理与宏观器件一样,主要是根据霍尔效应制造各种基于微机械加工的磁力计、位置传感器、电流传感器等。磁执行器则是在线圈电流的作用下产生磁场,对磁场中的器件产生机械力以实现致动。典型的如用于磁盘驱动器读写的磁头既是磁传感器也是磁执行器:当从磁介质上读取数据时,磁头作为磁传感器传感磁介质表面的磁场而产生电平;当向磁介质上写入数据时,磁头作为执行器在电流的作用下,产生机械力来改写磁介质表面内容。

6. 化学和生物传感器与执行器 化学和生物传感器与执行器的学科交叉相当广泛,应用中涉及到大量多学科的知识。化学传感器通过与环境中气体、液体、固体化学物质相互作用,来检测和识别某一种化学物质,它包括特定元素传感器、气体传感器、化学反应传感器等,可用于食品环境监测、医学病理诊断、电化学反应等。生物传感器主要指包含生物分子的传感器。化学执行器是指能够引起化学反应的器件,它通过化学反应产生电能。

四、微机电系统热点应用

继 MEMS 微加速度计成功应用于汽车安全气囊后,目前国际上已涌现出一大批面向应用的 MEMS 研究热点,涵盖了从民品到军品的各个应用领域。民用方面以微加速度计为代表,大量成熟的商业化 MEMS 产品已批量生产并取得效益;军事方面,因 MEMS 能够满足武器装备体积小、重量轻、功耗低、智能化、集成度高等要求,目前已被广泛应用到武器系统中,在未来军事应用领域将起着举足轻重的作用。

1. 军、民用加速度计 微加速度计应用范围很广,广泛用于汽车安全气囊的加速度计体积只有几毫米见方大小,售价仅为宏观加速度计的约 1/10,适于恶劣工作环境,具有巨大的市场潜力。在医疗方面,微加速度计可用于心脏脉动加速度测量,灵敏度可达 0.001g;军事上用于抗冲击的高 g 值加速度计测量范围可达到上万 g 甚至 10 几万 g,在智能弹药引信中用于最佳起爆控制,其尺寸和重量可大大减小,能满足引信设计微型化的需求。

2. 微惯性测量组合 通过集成三轴 MEMS 陀螺和加速度计,构成一个结构灵巧、价格便宜的惯性测量器件,可取代传统的惯性装置,用于车辆、摄像机等装置的稳定控制、姿态调节和个人导航系统。在军事上,惯性测量组合可装备各种精确制导武器,具有体积小、重量轻、抗高冲击性强等特点。美国陆军已在 81mm 迫击炮弹和“神剑”155mm 炮弹

上进行了试验;此外,美国海军也正在研究低成本的惯性测量单元,用于鱼雷的惯性制导。

3. **海量数据存储** 在硅片上制造的基于并行原子力分辨率的数据存储系统,将显著降低存储系统的尺寸、重量、存取等待时间、失效率和成本,且存储数据量大,存储密度达到 $1 \sim 100 \text{ Gb/cm}^2$,远远高于目前的磁存储和光存储。

4. **MOEMS** 目前正在研究的采用数字驱动微镜阵列芯片 DMD(Digital Micromirror Device)的光处理技术已开始应用到高分辨率的投影显示装置中。此外,光通信领域中的光开关、光调制器、光滤波器和复用器的研究,目前也取得了一定的成果。

5. **飞行器流体控制** 自适应流体控制正在研究将“智能蒙皮”用作襟翼附着在飞行器表面,通过偏转襟翼改变湍流结构可获得更好的空气动力学性能,使飞机产生俯冲、翻滚所需要的力矩。此外,美国国防部 DARPA 还在开发机翼上微喷管,发动机喷出的空气通过机翼下方的微喷管向外吹散,可以增加机翼下方的空气流量、增加升力大小。这一技术还适用于微型飞行器的飞行控制。

6. **智能微型机器人** 智能微机器人则是 MEMS 应用的高级形式,它是集成微传感器、微执行器、微机械元件和微控制技术的智能装置,总体尺寸在毫米左右。医疗上的微机器人可植入人体担当“外科医生”,随血液流动可提供冠状动脉信息、清除血栓,注入人体特定部位可针对癌细胞实施化疗。军事上的微型飞行器可用作战场环境信息侦察或用作外空间探测的无人操作机器人。航天领域目前正在研制的微型卫星重量不到 0.1 kg ,可由 1 枚运载火箭同时向太空发射多个微型卫星,形成覆盖全球的微卫星网络。

7. **分布式 MEMS 应用** 用于研究物理上分布的多个 MEMS 传感/执行器件所构成的网络。借助人工智能技术,每个 MEMS 器件作为一个主体(Agent),均拥有自治性和社会性,单个 MEMS 主体可完成局部的任务;众多的 MEMS 主体具有群体组织能力,能够为完成全局性目标而相互协调、共同作用;可广泛用于分布式智能控制系统、空间探测的群体机器人等领域。

8. **微型高能能源** 目前开发的微型能源有太阳能电池、燃料电池、微型内燃机热泵和新型电池。微型能源可以突破成本和重量的限制,提供高能动力保障,其能量密度要比现有的最好电池高出几十倍。

五、微机电系统技术的发展前景

总之,微机电系统研究在国际上已开展得如火如荼, MEMS 的概念、加工工艺,跨学科交叉以及应用系统等都是全新的研究领域,特别是在军事上应用的 MEMS 技术,更成为美国等发达国家掌握的高精尖技术。目前,微机电系统在应用系统设计、器件建模与仿真、MEMS 加工、MEMS 封装测试等方面还没有产生成熟的、系统性的方法,无论是其基础理论研究,还是应用系统研究,都有着广阔的空间,正吸引着众多研究者的注意。通过积累,逐步建立起

具有自主知识体系、自主开发制造平台、自主应用系统的 MEMS 综合开发环境,实现资源共享,将会加速 MEMS 技术和应用的发展。

参考文献

- [1] Richard Feynman. There is Plenty of Room at the Bottom. Microelectromechanical System. 1992.
- [2] Richard Feynman. Infinitesimal Machinery. Microelectromechanical System. Vol. 2(1), March, 1993.
- [3] William C. Tang. Darpa MEMS Program. <http://www.darpa.mil/mems/vision/index.html>.
- [4] Ho CM and Tai Y C. MEMS and its application for flow control. ASME Journal of Fluids Engineering. 1996.
- [5] Luo Hao, Fedder Gary K, Carley L. Richard. 1 mG lateral CMOS - MEMS accelerometer. Proceedings of the IEEE Microelectromechanical Systems (MEMS), 2000: 502 - 507.
- [6] Hui Kai Xie, G. K. Fedder. A CMOS - MEMS Lateral - axis Gyroscope. Proc. 2000 Int. Conf. on Modeling and Simulation of Microsystem, San Diego, CA, Mar 2000.
- [7] Cardarelli, Donato. An integrated MEMS Inertial Measurement Unit. IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium, 2002: 314 - 319.
- [8] Warnasch Albert, Killen Albert. Low Cost, High G, Microelectro - Mechanical Systems (MEMS), Inertial Measurements Unit (IMU) Program. IEEE PLANS, Position Location and Navigation Symposium, 2002: 299 - 305.
- [9] Connelly, J., Dennehy, N., +. MEMS - based GN & C Sensors and Actuators for Micro/ Nano satellites. Advances in the Astronautical Sciences, V 104, 2000: 561 - 576.
- [10] De Labacherie, Michel Thevenet. MOEMS Aevices and their Applications to Optical Telecommunication Systems. Annales des Telecommunications/ Annals of Telecommunications, V 58(9 - 10), September/ October, 2003: 1401 - 1423.
- [11] Chu, Patrick B., Lee, Shi - Sheng, et al. MOEMS - Enabling Technologies for Large Optical Cross - connects. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, V 4561, 2001: 55 - 65.
- [12] Lin, Liwei. Thermal Challenges in MEMS Applications: Phase Change Phenomena and Thermal Bonding Processes. Microelectronics Journal, V 34(3), March, 2003: 179 - 185.
- [13] Osiander, R., Champion, J. L., Darrin, M. A. MEMS in Aerospace Applications - Thermal Control Shutters. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, V 4587, 2001: 7 - 13.
- [14] DeVoe Don L. Thermal Issues in MEMS and Microscale Systems. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, V 25(4), December, 2002: 576 - 583.
- [15] Wise K D. Micromechanical Sensors Actuators and Systems. American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC, V32, Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems, 1991: 1 - 14.
- [16] Henning Albert K. Microfluidic MEMS. IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings, V 1, 1998: 471 - 486.
- [17] Cooley Patrick, Wallace David, Antoh Bogdan. Applications of Ink - jet Printing Technology to BioMEMS and Microfluidic Systems. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, V 4560, 2001: 177 - 188.

现代科学学科发展的聚散共生规律研究^{*} ——以环境科学体系的建构为例

李春景¹ 徐 飞²

(中国科学技术大学科技哲学部, 硕士生¹; 教授、博士生导师² 合肥 230052)

〔摘要〕 现代科学的学科发展正处于高度分化与高度综合相伴共生的特殊时期,“聚”、“散”共生是现代科学发展的重要特征。通过对环境科学多学科发展、跨学科交融的具体分析,以及相应学科体系建构的宏观考察,试图揭示现代科学聚散共生的基本状况和基本规律。

〔关键词〕 聚散共生 环境科学 学科交叉 [中图分类号] G3 X1

从科学发展史上看,学科的不断分化和不断综合,是两种经常起作用的基本趋势,整个现代科学就是沿着综合—分化—再综合的轨迹向前发展的。如今,现代科学正处于高度分化和高度综合相伴共生的新时期,聚散共生已成为现代科学发展的重要特征。某种意义上,散是聚的前提条件,聚是散的必然结果,它们之间的矛盾运动,构成了科学进步的一种新的内在动力。现代科学的聚散共生,就是这样一种科学发展的历史必然。众所周知,新的重大科学突破和学科生长点,往往发生在不同学科的交汇点上。环境科学及其分支学科群体的出现,就是聚散共生关系作用于现代科学发展的一个典型。

环境科学诞生于20世纪60年代,它是在人类认识解决环境问题的过程中逐步产生和发展起来的,是人类社会生产力和科学技术发展到一定阶段的产物。在其产生和发展过程中,环境科学经历了多学科发展、跨学科交融以及学科体系建构这样3个阶段,充分体现了现代科学发展聚散共生的重要特征。本文将环境科学体系为例,运用辩证法的思想剖析其历史演变过程,以期揭示现代科学这一新的发展趋势。

*国家自然科学基金资助项目《学科交叉模式与面向原创的管理》(70271059)的成果之一。

一、深入的发散:多学科分化发展的基本形式

近代科学乃至现代科学的萌芽,首先都是从科学的分化开始的。15世纪后,整个近代科学开始逐渐从囊括一切科学知识的总体系——自然哲学中分离和解脱出来,并衍生出众多的分支学科。从初级的综合状态向深层次分化状态的转变,是近代科学形成的一大标志,同时也是向成熟的现代科学体系发展的重要基础。目前,随着现代科学认识的不断深化,大量分支学科不断涌现,在纵深层次上形成了具有三级结构、包含数千门学科的现代科学知识体系,充分展示出现代科学分工的细化趋势。科学发展到今天,学科的分化一直发挥着重要的作用,同时也构成现代科学发展的一个重要特征。只有通过分化发散,人类才能对某一个特定问题或现象进行多角度、多方面的深入研究,才能在庞大的学科体系中寻找科学发展的新增长点。在环境科学的发展中,充分地体现了现代科学学科发展分化发散的规律性。

20世纪60年代以后,由于全球气候变暖、臭氧层出现空洞、生物多样性锐减和自然资源日渐枯竭等一系列全球性环境问题竞相出现,环境问题已成

- [18] Niarchos, D. Magnetic MEMS: Key Issues and Some Applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, V 109 (1-2), Dec., 2003: 166-173
- [19] Chen F, Xie H, Fedder G. K. A MEMS-based Monolithic Electrostatic Microactuator for Ultra-low Magnetic Disk Head Fly Height Control. *IEEE Transactions on Magnetics*, V 37(4), July, 2001: 1915-1918.
- [20] Ruffin, Paul B. MEMS-based Sensor Arrays for Military Applications. *The International Society for Optical Engineering*, V 4700, 2002: 111-121.
- [21] Varadan V. K., et al. Smart Structures and Materials 2002: Smart Electronics, MEMS, and Nanotechnology. *The International Society for Optical Engineering*, V 4700, 2002: 357.
- [22] George, Thomas. Overview of MEMS/ NEMS Technology Development for Space Applications at NASA/ JPL. *The International Society for Optical Engineering*, V 5116(1), 2003: 136-148.

- [23] 丁衡高. 微系统与微米/纳米技术及其发展. 第四届全国微米/纳米技术学术会议. 上海, 2000: 1-6
- [24] <http://www.863.org.cn/863-105/applyguide/applyguide2/index.html>.
- [25] Gregory T. A. Kovacs 著. 张文栋等译. 微传感器与微执行器全书. 北京: 科学出版社, 2003
- [26] 高世桥, 曲大成. 微机电系统在武器中应用的发展战略研究. 国防研究报告, 2001
- [27] 高世桥, 马宝华. MEMS技术在引信安全系统中应用的探索性研究. 中国国防科研报告, 1998
- [28] 马宝华, 高世桥. 抓住MEMS技术带来的机遇, 实现我国引信技术大跨度发展. 中国国防科研报告, 1996
- [29] 金磊, 高世桥, 李文杰. 微加速度传感器硅微结构设计. *传感器技术*, 2000, 19(2): 23-25
- [30] 金磊, 高世桥, 李文杰. MEMS固态引信硅微结构的力学分析与设计. *兵工学报*, 2000, 21(增): 45-46

(责任编辑 苏青)