

# MEMS传感器研究现状与发展趋势

何成奎

(达州职业技术学院, 四川达州 635001)

**摘要:** 微型化、集成化及智能化是当今科学技术的主要发展方向。随着微机电系统 (Micro Electro Mechanical System, MEMS) 和微加工技术的发展, 微型传感器也随之迅速发展。介绍了MEMS传感器概念及种类, 并对其研究现状、应用领域进行了分析总结和介绍。最后, 对MEMS传感器的一些发展趋势进行了论述和展望。

**关键词:** MEMS; 传感器; 微系统

## 0 引言

MEMS传感器是采用微电子和微机械加工技术制造出来的新型传感器。与传统的传感器相比, 它具有体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点。同时, 微米量级的特征尺寸使得它可以完成某些传统机械传感器所不能实现的功能。第一个微型传感器诞生于1962年, 至此开启了MEMS技术的先河<sup>[1]</sup>。此后, MEMS传感器作为MEMS技术的重要分支发展速度最快, 长期受到美、日、英、俄等世界大国的高度重视, 各国纷纷将MEMS传感器技术作为战略性技术领域之一, 投入巨资进行专项研究。随着微电子技术、集成电路和加工工艺的发展, 传感器的微型化、智能化、网络化和多功能化得到快速发展, MEMS传感器逐步取代传统的机械传感器, 占据传感器主导地位, 并在消费电子、汽车工业、航空航天、机械、化工、医药、生物等领域得到了广泛应用。

## 1 MEMS传感器及分类

从微小化和集成化的角度, MEMS (或称微系统) 指可批量制作的、集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路, 直至接口、通讯和电源等于一体的微型器件或系统<sup>[2]</sup>。微机电系统 (MEMS) 是在微电子技术的基础上发展起来的, 融合了硅微加工和精密机械加工等多种微加工技术, 并应用现代信息技术构成的微型系统。是20世纪末、21世纪初兴起的科学前沿, 是当前十分活跃的研究领域, 涉及多学科的交叉, 如物理学、力学、化学、生物学等基础学科和材料、机械、电子、信息等工程技术学科<sup>[3]</sup>。该领域研究时间虽然很短, 但是已经在工业、农业、机械电子、生物医疗等方面取得很大的突破, 同时产生了巨大的经济效益。

### 2.1 MEMS传感器

MEMS传感器是采用微机械加工技术制造的新型传感器, 是MEMS器件的一个重要分支。依赖于MEMS技术的传感器主要有以下技术特点:

- 1) 微型化: 体积微小是MEMS器件最为明显的特征, 其芯片的尺度基本为纳米或微米级别。
- 2) 多样化: MEMS的多样化主要表现在其工艺、应用领域及材料等方面。
- 3) 集成化: 通过MEMS工艺, 可以实现对功能、敏感方向不

同的多个传感器的集成, 形成微传感器阵列或微系统。

4) 尺度相应现象: MEMS芯片尺度的缩小, 对原有理论基础带来了较大影响, 如力的尺寸效应、微摩擦学、微构造学、微热力学等, 都需要更加深入的研究。

5) 批量化: MEMS器件与微电子芯片相似, 可进行大批量生产且生产成本不高, 有利于MEMS产品工业化规模经济的实现。

## 2.2 MEMS传感器典型分类

MEMS传感器按照测量性质可以分为物理MEMS传感器、化学MEMS传感器、生物MEMS传感器<sup>[4]</sup>。其中每种MEMS传感器又有多种细分方法, 如微加速度计, 按检测质量的运动方式划分, 有角振动式和线振动式加速度计; 按检测质量支承方式划分, 有扭摆式、悬臂梁式和弹簧支承方式; 按信号检测方式划分, 有电容式、电阻式和隧道电流式; 按控制方式划分, 有开环和闭环式。

## 2 MEMS传感器研究现状

MEMS技术最早由年的诺贝尔物理奖得主Richard P Feynman于1959年提出。1962年硅微型压力传感器问世。1979年Roylance和Angell开始压阻式微加速计的研制。1991年Cole开始电容式微加速度的研制。1998年, 美国CSDL设计研制了最早的MEMS陀螺。同年, Draper实验室研制了另一种形式的MEMS陀螺。

1993年, 美国ADI公司采用技术成功实现微型加速度计的商品化, 大批量应用于汽车防撞气囊, 标志着MEMS技术商品化的开端。20世纪90年代, 发达国家先后投巨资并设立国家重大项目促进其发展。此后, MEMS技术发展迅速, 特别是围绕深槽刻蚀技术发展出多种新型加工工艺。近年美国朗讯公司开发的基于MEMS光开关的路由器已经试用, 预示着MEMS有一个发展高潮的来临。

近年来, 关于无线传感器网络的研究越来越受到重视, 节点定位技术是无线传感器网络的关键问题之一, 李建坡、穆宝春等人分析了无线电的路径损耗模型, 建立了基于信号接收强度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI) 和距离的拟合关系模型, 提出了一种基于协同预测的无线传感器网络全移动节点定位方法。该方法解决了当能够与未知节点通信的锚节点数量少于3个而不能定位的问题, 算法利用未知节点历史时刻的位置信息辅助当前时刻的未知节点定位, 即把未知节点历史时刻的位置作为锚节点的位置, 速度值作为通信半径对未知节点进行辅助定位<sup>[5]</sup>。仿真结果表明, 与传统RSSI定位算法相比, 该算法的定位成功率提高了约30%, 每轮的平均相对误差降低了约47%。

压力传感器、陀螺仪等力学MEMS传感器依然是研究的热点与重点。韩盈党与李哲设计了一种基于微机电系统 (MEMS) 加速度传感器的数据采集单元, 用微处理器通过内部集成电路 (I2C) 总线采集加速度传感器ADXL345的数据, 对数据进行低通滤波、零偏误差修正以及去除重力加速度等, 从而得到载体的运动加速度, 并对加速度进行二次积分得到位移, 在100 m范围内实测多次, 仿真计算位移误差在2%以内, 取得了良好的效果<sup>[6]</sup>。为实现微型化、抗电磁干扰、可长时间工作和可远距离传输的加速

**基金项目:** 四川革命老区发展研究中心资助项目 (SLQ2017B-09)

**作者简介:** 何成奎 (1973—), 男, 四川达州人, 教授, 主要从事机械加工、液压技术方面的研究。

度传感器,钟少龙等人提出了一种基于微机电系统(MEMS)非对称扭镜结构的光纤加速度计设计方案,并利用对角度变化非常敏感的双光纤准直器对扭镜的扭转角度变化进行检测<sup>[7]</sup>。利用MEMS加速度传感器测量速度和位移,目前国内工业和学术领域应用还相对较少,且测量位移精度较差或精度范围有限<sup>[8]</sup>。

针对压力传感器存在零点温漂、灵敏度温漂等现象,关荣锋等人采用恒流激励条件下压力传感器的批量温度补偿的方法对压力传感器进行温度补偿,补偿后零点温漂为 $0.004\% \sim 0.015\%$  FS0/°C,灵敏度温漂为 $0.0035\% \sim 0.024\%$  FS0/°C,取得了良好的补偿效果<sup>[9]</sup>。

威尔玛和雅达<sup>[10]</sup>提出了用于噪声建模的MEMS电容传感器理论框架,用指数指数自相关函数来描述噪声的固有过程,给出了随机共振在MEMS悬臂响应数值实例分析。

在结构分析方面,于京明采用编程分析研究了微梳齿谐振器在受到空气阻尼时的动态特性,程序建立在对微谐振器结构和功能的分析上,通过添加条件和约束建立程序模型,采用不同的有限单元类型代替微梳齿谐振器不同的功能部件,其中采用单元类型设置空气阻尼模型,最后通过分析结果数据总结出空气阻尼对微梳齿谐振器振动的动态特性影响<sup>[11]</sup>,与其他方法相比,此方法快速、实用、适应性好。为后续的微谐振器的动态分析和建立系列化微谐振器器件的动态特性分析求解程序提供了理论依据。

各国的研究机构、公司及大学都非常重视MEMS传感器技术的发展,在这一方面,欧美及日本具有较大的优势。相比之下,我国的MEMS传感器技术在可靠性、灵敏度以及提升新技术能力方面还处于落后的状态,MEMS传感器的很多品种还不能够实现批量生产,产品的实用化及产业化性能较低。但是,相信随着社会的快速发展及科学技术的不断进步,MEMS压力传感器技术一定会得到进一步的提高与完善,应用领域也会越来越广阔,为社会创造更多的价值与财富。

### 3 MEMS传感器运用现状

#### 3.1 汽车上的MEMS传感器

汽车上采用的传感器中大约 1/3 传感器采用的是MEMS传感器,并且汽车越高级,采用的MEMS传感器越多<sup>[12]</sup>。汽车上MEMS传感器主要应用于发动机运行管理、车辆动力学控制、自适应导航、车辆行驶安全系统、车辆监护和自诊断等方面。

物理 MEMS传感器是汽车上采用得最为普遍的传感器,基本上在汽车电子控制的各个方面都有涉及;化学MEMS传感器主要是指测量汽车系统中气体成分的气体传感器;生物MEMS传感器更多地应用于预测驾驶疲劳等汽车行驶安全领域。

#### 3.2 生物医疗和生物医学方面的应用

MEMS传感器在生物医疗中的应用较为广泛。目前,MEMS传感器主要用于临床化验系统、诊断与健康监测系统中,包括压力传感器、集成加速度传感器、微流体传感器等<sup>[13]</sup>。通过口服或皮下注射的方式,将MEMS传感器送至人体内实现对人体内各器官的有效监测。同时,也可在监测的基础上,清除人体内可能存在的癌细胞,利用特制微型仪器将人体内部油脂沉积物刮去,降低心脏病发生的可能性,并去除人体内部胆固醇。在生物医学应用方面,MEMS传感器由于其微小的体积,能顺利进入较小的器官与组内,精确监测内部器官与

组织的具体运作状况,进而提高介入治疗的精度,降低手术风险。

#### 3.3 军事方面的应用

MEMS现已被应用于空间超微型卫星中,其卫星仅重250 g,尺寸极小。并且由于小卫星传感器的飞行寿命并不长,使其在宇宙辐射下的暴露不存在较大问题。MEMS轮胎压力传感器已被广泛应用于一些发达国家的军队装甲运兵车轮胎内。通过分布式战场微型传感器网络系统,军队能准确探测到对方的作战部署以及其调动的各类探测装置。这种分布式场微型传感器还具备耐久、易损、布设等优点,受军队所推崇。在空军应用上,利用F-14战斗机弹射座助推火箭对MEMS压力传感器进行了测试。将用于喷射式涡轮发动机材料应用到对该类发动机进行监视的具备力学特征的MEMS传感器中,增强了其抗恶劣环境的性能<sup>[14]</sup>。在战况信息传达上,现已成功研发出机载传感器以及用于信息传输的微通信元件与微功率源。这些新型微系统芯片的投入应用,让无人驾驶机与战斗机具备了通信、地形识别等实用性较强的新型功能。

#### 3.4 航空航天方面的应用

在航空、航天领域内,MEMS有着较大的应用前景。MEMS技术的使用,在很大程度上提高了航空器的性能。在今后发展中,MEMS传感器可被广泛安置于飞机的关键部位,实现对机重要运行部件的精确控制与测量,包括气流、声学、力学等方面,提供及时的信息与对执行部件的实时控制,在确保飞机飞行的平稳的同时,最大限度地抑制飞机飞行产生的噪音,并实现对飞机燃料的高效利用<sup>[15]</sup>。在宇航中,关于星际物质与生命起源的探测方面,可应用全集成气相色谱微系统,将其散布于太空中,达到探测目的。同时,将特制微机器人传送至特定星球,并围绕星球飞行,由配置的摄像系统协助轨道器,绘制出相关星球的地形地貌特征。

#### 3.5 惯性MEMS器件产品

微加速器与微型陀螺为当前惯MEMS器件的主要产品,已被广泛应用于汽车制造领域内。商用微型加速度计运动部件具备高质、高灵敏度、重量轻等优点。其测量精度高达1 mg,能有效实现对千分之几的重力加速度的测量。汽车工业是促使微加速器商业化最主要动力之一,最具代表性的为美国模拟器件公司所研发的ADXL05与ADXL50系列单片集成差动电容式加速器,其年均产量高达2 400万件。目前,传统的机电式加速度传感器市场正逐步被微加速度计所占领,并随着汽车安全气囊系统的不断普及,呈现出迅猛增长趋势。

#### 3.6 无线传感器网络

无线传感器网络综合了现代传感器技术、微电子技术、通信技术、嵌入式计算技术和分布式信息处理技术等多个学科,是新兴的交叉研究领域,具有重要的科研价值和广泛的应用前景,引起了全世界范围的广泛关注。2003年2月,美国《Technology Review》杂志评出对人类未来生活产生深远影响的十大新兴技术,传感器网络被列为第一<sup>[16]</sup>。近年来,世界各国对无线传感器网络的研究投入了极大的热情,多项相关研究计划已付诸实施,如美国IBM提出的“智慧地球”、欧洲的“环境智能”(Ambient Intelligence, AmI)、日本的“U-Japan”、韩国的“U-Korea”等。

我国在WSN方面也开展了大量研究工作并取得了许多研究成



果,目前正在进一步加大力度推进传感网的研究和应用。

#### 4 MEMS传感器发展趋势

基于MEMS技术的微型传感器具有降低汽车电子系统成本及提高其性能的优势,它们已开始逐步取代基于传统机电技术的传感器,将成为汽车传感器的主流产品。特别是MEMS传感器网络的研究是未来的一个重点研究领域,展望有以下几个研究方向。

1) 无源化:在物联网时代,网络化的测控系统往往需要用到无线MEMS传感器,作为将非电量转化为电量的传感器,电源是关键点。利用能量收集芯片收集太阳能、风能等其他能源,再将其转换为电能为传感器提供电源,无线传感模块与能量收集技术的结合将使MEMS传感器实现无源化。

2) 材料多样化:随材料合成技术的发展以及制造工艺的多样化,研究人员将氧化锆功能陶瓷、软磁薄膜和薄带材料、光纤材料、生物材料等新型材料用于制造MEMS传感器,传感器的制造材料将更加多样化。

3) 微型化:可佩戴技术、便携式设备越来越要求传感器的小型化,纳米技术、集成化技术以及封装技术的研究发展将推进MEMS将实现更小的封装。

4) 节点微型化:利用现在的微机电、微无线通信技术,设计微体积、长寿命的传感器节点是一个重要的研究方向。伯克利大学研制的尘埃传感器节点,把传感器的大小降低到一个立方毫米,使这些传感器颗粒可以悬浮在空中。

5) 寻求系统节能策略:无线传感器网络应用于特殊场合时,电源不可更换,因此功耗问题显得至关重要。现在国内外在节点的低功耗问题上已经取得了很大的研究成果,提出了一些低功耗的无线传感器网络协议,未来将会取得更大的进步。

6) 低成本:由于传感器网络的节点数量非常大,往往是成千上万个。要使传感器网络达到实用化,要求每个节点的价格控制在1美元以下,而现在每个传感器节点的造价大约在80美元左右。如果能够有效地降低节点的成本,将会大大推动传感器网络的发展。

7) 节点的自动配置:未来将着重于研究如何将大量的节点按照定的规则组成一个网络。当其中某些节点出现错误时,网络能够迅速找到这些节点,并且不影响到网络的正常使用。配置冗余节点是必要的。

8) 传感器网络安全性问题和抗干扰问题:与普通的网络一样,传感器网络同样也面临着安全性的考验,即如何利用较少的能量和较小的计算量来完成数据加密、身份认证等。在破坏或受干扰的情况下可靠地完成执行的任务,也是一个重要的研究课题。

#### 5 结语

通过近几年的研究,人们对传感器网络固有特点的认识已经逐渐明确。但是,传感器网络要真正实用化,在基础层、网络层等方面都有许多基础性问题 and 关键技术需要解决。目前全球范围内的传感网还非常分散,且都是局部的专属应用,跟所设想的“感知一切、充满智慧”的物联网还有相当的距离。已出现的如远程防盗、高速公路不停车收费、智能图书馆、远程电力抄表等这些具体的应用仅是物联网的雏形,还尚未形成一个庞大的网

络。随着传感网技术的发展与成熟,未来传感网将和目前的互联网、通信网组成一个更加庞大、复杂的网络。无线传感器网络技术将会不断的产生新的应用模式,从各个方面为我们的生活带来深远的影响。

当前,MEMS传感器技术还处于高速发展的初级阶段,随着社会经济与技术的发展,其广泛应用与实际效益将会不断凸显出来。MEMS传感器的应用与发展,将会对医学、生物学、热学、光学、力学、工程学等诸多领域产生较为深远的影响,人类的生活、生产方式会因此而发生重大变革。

#### 参考文献

- [1] Ge M, Choo K R, Wu H, et al. Survey on key revocation mechanisms in wireless sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2016, 63: 24-38.
- [2] 肖顺. 微机电系统的研究与应用[J]. 江西化工, 2014, (01): 244-246.
- [3] 陈勇华. 微机电系统的研究与展望[J]. 电子机械工程, 2011, (03): 1-7.
- [4] 郝旭欢, 常博, 郝旭丽. MEMS传感器的发展现状及应用综述[J]. 无线互联科技, 2016, (03): 95-96.
- [5] 李建坡, 穆宝春. 基于协同预测的无线传感器网络全移动节点定位算法[J]. 计算机应用研究, 2017 (01): 1-6.
- [6] 韩盈党, 李哲. MEMS加速度传感器的数据采集和预处理[J]. 仪表技术与传感器, 2015, (02): 16-19.
- [7] 钟少龙, 龙亮, 李明等. 基于光纤检测技术的扭转敏感微机电系统加速度传感器[J]. 中国激光, 2014, (03): 108-115.
- [8] Gao C, Jian L, Luo S. Modeling of the Thermal State Change of Blast Furnace Hearth With Support Vector Machines[J]. 2012, 59 (2): 1134-1145.
- [9] 关荣锋, 王晓雪. MEMS压力传感器的温度补偿[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2009, (01).
- [10] Son J, Ahn B, Ha J, et al. An availability of MEMS-based accelerometers and current sensors in machinery fault diagnosis[J]. Measurement, 2016, 94: 680-691.
- [11] 于京明. 微机电系统微传感器的结构分析和优化研究[D]. 东华大学, 2013.
- [12] 李文平, 顿文涛, 李寅生等. MEMS传感器在汽车中的应用研究及进展[J]. 农业网络信息, 2015, (07): 52-55.
- [13] 陈俊江, 李华, 汤呈祥等. 基于MEMS传感器的肢体康复程度检测系统[J]. 沿海企业与科技, 2015, (04): 28-32.
- [14] 孙其瑞. 基于MEMS传感器的微小型无人机测控系统关键技术研究[D]. 中北大学, 2014.
- [15] 孟禹彤, 项剑锋, 赵朋远. MEMS传感器在航空综合电子备份仪表中的应用[J]. 通讯世界, 2015, (05): 188.
- [16] 马溪源. 无线传感器网络概述及运用[J]. 山东工业技术, 2015, (11): 138.