



前沿感知技术

当前,无人系统、智能制造、智慧交通、智慧城市以及可穿戴技术正在迅速发展,人类对传感器的需求越来越广泛,并且要求传感器具备微型化、集成化、智能化、低功耗等特点,传感技术出现了新的发展趋势。

1. 传感器新型化

基于各种物理、化学、生物的效应和定律,继力敏、热敏、光敏、磁敏和气敏等敏感元件后,开发基于新原理、新效应的敏感元件和传感元件,并以此研制新型传感器是发展高性能、多功能、低成本和小型化传感器的重要途径。

例如,在军事医学领域,利用酶电极选择性好、灵敏度高、响应快的特点研发生物传感器,能及时快速检测细菌、病毒及其毒素等,实现生物武器的有效防范。利用量子力学中的有关效应,可设计、研制量子敏感器件,像共振隧道二极管、量子阱激光器和量子干涉部件等。这些元器件具有高速度(比电子敏感器件速度提高 1000 倍)、低功耗(比电子敏感器件能耗降低 1000 倍)、高效率、高集成度、经济可靠等优点。

2. 传感器微型化

纳米电子学的发展给传感技术领域带来新的变革,利用纳米技术制作的传感器,尺寸减小、精度提高、性能大大改善,纳米传感器站在原子尺度上,极大地丰富了传感器的理论,推动了传感器的制作水平,拓宽了传感器的应用领域。

MEMS 传感器的出现更是引起了传感器领域的技术革命。MEMS (Microelectro Mechanical Systems, 微机电系统) 传感器是在微电子技术基础上发展起来的,是集微机构、微传感器、微执行器、控制电路、信号处理、通信、接口、电源等于一体的微型系统或器件,是对微/纳米材料进行设计、加工、制造、测量和控制的技术。

3. 传感器集成化

集成化是指多种传感功能与数据处理、存储、双向通信等的集成。压力、静压、温度三变量传感器;气压、风力、温度、湿度四变量传感器;微硅复合应变压力传感器和阵列传感器等,都使用了集成技术。传感器集成化有两种:一种是通过微加工技术在一个芯片上构建多个传感模块,组成线性传感器(如 CCD 图像传感器);另一种是将不同功能的敏感元器件制作在同一硅片上,制成集成化多功能传感器,集成度高、体积小,容易实现补偿和校正。微加工技术和精密封装技术对传感器的集成化有重大的影响。

5.1 仿生传感器

仿生传感器是一种采用新的检测原理的新型传感器,它采用固定化的细胞、酶或者其他生物活性物质与换能器相配合组成,是基于生物学原理设计的可以感受规定待测物并按照一定规律转换及输出可用信号的器件或装置,是一种采用新的检测原理的新型传感器,

由敏感元件和转换元件组成,辅之以信号调整电路或电源等。这种传感器是近年来生物医学和电子学、工程学相互渗透而发展起来的一种新型的信息技术。

仿生传感器能够模拟某些生物体功能,其应用领域遍及生物医学中人体感受器官的诊断和修复、智能机器人、食品、环境、大气污染的监测、军事安全、化学和生物武器以及反恐等。例如,具有仿生功能的人工眼、人工耳、人工鼻、人工舌以及人工皮肤,用于人体感受器官损伤的修复和替代;用于现场对食品和环境质量进行快速检测和鉴别的电子鼻和电子舌。在化学和生物战中,仿生传感器能对其所怀疑的病菌实行快速监控,使人们尽早检出病菌。在未来的小型、微型甚至纳米机器人中,如模拟蜜蜂、蝴蝶甚至蟑螂的小型机器昆虫将配备众多的仿生传感器。

近年来,随着生物医学和微电子加工技术的快速发展和人类生活质量的不断提高,用仿生技术研制各种具有感觉功能的用于损伤修复的人工器官得到快速的发展。国际上仿生传感器的研究首先是从检测和识别物理量开始的,特别是在人工视觉、人工听觉和人工触觉的研究方面呈现出非常活跃的局面。

仿生传感器常分为嗅觉传感器、味觉传感器、听觉传感器、视觉传感器、触觉传感器等;仿生传感器按照使用的介质可以分为酶传感器、微生物传感器、细胞传感器、组织传感器等。

1. 嗅觉仿生传感器

动物是凭借灵敏的鼻子来闻出各种各样不同的气体,并做出相应的生理反应的。仿生嗅觉传感器主要是利用具有交叉式反应的气敏元件组成一定规模的气敏传感器阵列来对不同的气体进行信息提取,然后将这些大量复杂的数据交由计算机进行模式判别处理。气敏传感器阵列实现了气味信息从样品空间到测量空间的转换,是仿生嗅觉信息处理的关键环节。不同传感原理和制作工艺的气敏传感器丰富了仿生嗅觉传感器对气味信息的获取途径,常用的有金属氧化物半导体、石英晶体微天平、导电聚合物、声表面波等。构建阵列的传感器除了应该满足响应快且可逆、重复性好、灵敏度高条件,还必须对各种气味广谱敏感,并且阵列中各传感器对同种气味要交叉敏感,以保证从有限数量的传感器中获取更多的气味信息。

2. 味觉仿生传感器

味蕾是人的味觉感受器,每个味蕾都是由一组味觉细胞组成的梨形结构,属于化学感受器。味蕾由味觉细胞和支持细胞所组成的卵圆形小体,主要分布于轮廓、菌状和叶状乳头中,软腭、会厌和咽的上皮内也有少量存在。味蕾顶端有一个称为味孔的小孔与口腔相通,当溶解的食物进入味孔时,味觉细胞受刺激而兴奋,经神经传到大脑而产生味觉。味蕾能感觉甜、苦、酸、咸等味觉刺激。味觉仿生传感器由敏感元件和信号处理装置组成,敏感元件又分为分子识别元件和换能器两部分,分子识别元件一般由生物活性材料,如酶、微生物及DNA等构成。根据不同的原理,味觉仿生传感器主要有膜电位分析味觉传感器、伏安分析味觉传感器、光电方法的味觉传感器、多通道电极味觉传感器、生物味觉传感器、基于表面等离子共振原理制成的味觉传感器、凝胶高聚物与单壁碳纳米管复合体薄膜的化学味觉传感器、硅芯片味觉传感器等。

3. 触觉仿生传感器

触觉仿生传感器是用于模仿触觉功能的传感器,按功能可分为接触觉传感器、力-力矩

觉传感器、压觉传感器和滑觉传感器等。接触觉传感器是用来判断机器人是否接触到外界物体或测量被接触物体的特征的传感器。接触觉传感器有微动开关、导电橡胶、含碳海绵、碳纤维、气动复位式装置等类型。滑觉传感器用于判断和测量机器人抓握或搬运物体时物体所产生的滑移,它实际上是一种位移传感器。按有无滑动方向检测功能可分为无方向性、单方向性和全方向性3类。

目前,虽然已经研制成功了许多仿生传感器,但仿生传感器的稳定性、再现性和批量生产性明显不足。因此,以后除继续开发出新系列的仿生传感器和完善现有的系列之外,生物活性膜的固定化技术和仿生传感器的固态化也值得进一步研究,在不久的将来,模拟生物功能的嗅觉、味觉、听觉、触觉仿生传感器将出现,有可能超过人类五官的能力,完善目前机器人的视觉、味觉、触觉和对目的物进行操作的能力。

5.2 MEMS 传感器

MEMS的起源可以追溯到20世纪五六十年代,最初贝尔实验室发现了硅和锗的压阻效应,从而导致了硅基MEMS传感器的诞生和发展。在随后的几十年里,MEMS得到了飞速发展。特别是近年来,MEMS在微电子技术、新材料、生物医学等多学科的推动下,得到了迅猛发展。MEMS应用很广泛,在很多领域都有着十分广阔的应用前景,已经成为21世纪初的支柱产业。常见的MEMS传感器主要包括微机械压力传感器、微加速度传感器、微机械陀螺等。

1. 微机械压力传感器

微机械压力传感器是最早开始研制的MEMS传感器,也是微机械技术中最成熟、最早开始产业化的产品。MEMS压力传感器在汽车传动系统压力感测医学外科手术中有着广泛的应用。

2. 微机械陀螺

角速度一般是用陀螺仪来进行测量的,传统的陀螺仪主要是利用角动量守恒原理,因此它主要是一个不停转动的物体,它的转轴指向不随承载它的支架的旋转而变化。MEMS陀螺仪的工作原理不是这样的,因为要用微机械技术在硅片衬底上加工出一个可转动的结构并非易事,MEMS陀螺仪利用科里奥利力——旋转物体在有径向运动时所受到的切向力。如果物体在圆盘上没有径向运动,科里奥利力就不会产生。因此,在MEMS陀螺仪的设计上,这个物体被驱动,不停地来回做径向运动或者振荡,与此对应的科里奥利力就是不停地在横向来回变化,并有可能使物体在横向作微小振荡,相位正好与驱动力差 90° 。因为科里奥利力正比于角速度,所以由电容的变化可以计算出角速度。

3. 微机械温度传感器

微机械传感器与传统的传感器相比,具有体积小、重量轻的特点,其固有热容量仅为 $10^{-15} \sim 10^{-8} \text{ J/K}$,使其在温度测量方面具有传统温度传感器不可比拟的优势。

5.3 集成传感器

多功能集成化传感器具有小型化、结构简单和低成本等显著优势,已受到越来越多的关注。近年来,随着电子产品不断向着小型化、移动化的方向发展,对多传感器进行集成逐渐成为了研究热点。多传感器的集成可以让传感器系统拥有更小的体积、更低的功耗以及

更好的性能,让传感器系统在一个封装体中可以同时实现多种物理和化学参数的测量。由于传感器的配置和测量机制不同,已有不同的方案来实现多个传感器的集成,包括片上系统(SoC)与系统级封装(SIP)。片上系统是在一个芯片上集成多个传感器,形成一个传感器系统。SIP 是使多种具备不同功能器件的组合物形成一个系统的方法。SoC 集成在尺寸、功耗、成本、性能和可靠性方面优于其他同类产品,然而,由于不同的配置、不同的传感机制、不同的制造工艺和不同的封装方案,SoC 仍然面临着一些技术挑战,只有小部分具有相似结构、传感机制和封装方案的传感器可以实现单片 SoC 集成。随着小型化需求的增加,为了进一步减小体积,则需要将芯片或器件在垂直方向上进行堆叠。与水平排布相比,3D 集成能够实现更多功能,且结构更为紧凑,但其制造工艺也更加复杂。3D 集成技术在实现多传感器的可靠集成、提高系统性能、降低功耗等方面展现出了巨大的潜力。

集成传感器需要解决的主要问题是工艺兼容、封装设计等。

多传感器集成可以充分发挥其短互连、小型化和紧凑封装的优点。但是,将这些采用不同工艺且结构不同的器件集成到单片系统中,存在诸多兼容性问题。部分 MEMS 传感器可以直接在常规 IC 工艺序列中完成加工,如温度传感器、CMOS 图像传感器、霍尔传感器、指纹传感器等,通常不需要额外的特殊工艺。但诸如加速度计、陀螺仪、音频采集等,因为其内部具有三维可动的敏感结构及需要构建薄膜空腔等,所以无法通过常规 IC 工艺直接加工完成,需要通过 MEMS 加工工艺进行生产,其中的 MEMS 工艺传感器芯片与其他工艺传感器芯片和后端处理芯片在多个方面存在明显差异,工艺兼容性是集成的难点。

在封装方面,为减少外界环境对敏感结构的影响,内部芯片的封装方法与形式的设计是极其重要的一个环节,这对减少传感器的线性误差、提高传感器的灵敏度及稳定性具有重要意义。在多传感器集成系统的封装过程中,传感器的多样性决定了需要对各个不同敏感结构的封装材料进行特性分析,包括耐温特性、抗热冲击特性和热机械相容性。此外,还需要对封装结构的尺寸、质量和气密性进行特性分析,如陀螺仪、气压传感器等敏感结构需要进行真空封装。

另外,多物理场耦合也是集成传感器需要解决的问题。多传感器集成系统具有复杂的结构,各部分采用的工艺、材料不同,使得各部分的电学、力学和热学等物理学特性相差很大,系统内的多个物理场(电磁场、热场和电迁移静应力场等)之间存在相互耦合作用,使得建模和仿真的实现存在很大难度,同时其可靠性也是一大问题。因此,如何解决集成系统中电场、磁场、力场之间的耦合仿真计算问题,如何抑制系统内的各类耦合噪声以保证信号和电源的完整,都是多传感器系统需要研究的主要内容。