

# 智能传感器技术的研究进展及应用展望

尤政

清华大学精密仪器系, 北京 100084

**摘要** 随着智能时代的到来,各种智能传感器的研究和应用越来越受到人们的重视。智能传感器在传统传感器的基础上还具有丰富的信息处理能力,能够提供更综合的功能。本文介绍了常用的温度、压力、惯性、生化和RFID传感器的研究现状及其在物联网、虚拟现实(VR)、机器人、医疗健康等产业升级和创新应用中的关键作用,并对智能传感器今后的发展趋势进行了展望。

**关键词** 智能传感器;微机电系统;物联网;产业化

智能传感器(smart sensor)指具有信息检测、信息处理、信息记忆、逻辑思维和判断功能的传感器。相对于仅提供表征待测物理量的模拟电压信号的传统传感器,智能传感器充分利用集成技术和微处理器技术,集感知、信息处理、通信于一体,能提供以数字量方式传播的具有一定知识级别的信息。

自美国宇航局(NASA)在20世纪80年代提出智能传感器的概念以来,经过几十年的发展,智能传感器已成为传感器技术的一个主要发展方向,代表着一个国家的工业及技术科研能力。在当前智能时代的推动下,传感器的重要性更加凸显,不仅在《中国制造2025》、《德国2020高技术战略》及欧盟、美国、韩国、新加坡等推进的智慧城市等战略方面发挥着重要的支撑作用,而且也在物联网、虚拟现实(VR)、机器人、智能家居、自动驾驶汽车等产业发展中发挥着关键作用。高性能、高可靠性的多功能复杂自动、测控系统以及基于射频识别技术的物联网的兴起与发展,愈发凸显了具有感知、认知能力的智能传感器的重要性及其大力、快速发展的迫切性。随着与CMOS兼容的MEMS技术的发展,微型智能传感器的发展得到了有力的技术支撑,智能传感器产业面临着一个非常重要的历史发

展契机。

本文综述不同种类智能传感器技术及应用的发展现状,并对今后的发展趋势做出展望。

## 1 丰富多样的智能传感器

为满足各种智能化的应用需求,传感器类别非常多样化,例如:环境传感器、惯性传感器、模拟类传感器、磁性传感器、生物传感器、红外传感器、振动传感器、压力传感器、超声波传感器等。其中,以下传感器比较常用。

环境传感器,主要有气体传感器、气压传感器、温度传感器、湿度传感器等。气体传感器可以应用于空气净化器、酒驾监测器、家装中甲醛等有毒气体的检测器以及工业废气的检测装置等。随着人们对环境问题的重视,环境传感器的重要性越来越凸显,未来有很大的发展空间。

惯性传感器,主要应用在可穿戴产品上,比如智能手环、智能手表、VR头盔等。通过惯性传感器来检测运动的跟踪、识别,告知佩戴者当天的运动量、消耗的卡路里及运动的效果。

磁性传感器,主要用在家用电器上,比如咖啡机、热水器、空调等,用来检测角度转了多少或者行程多少,通常显示在仪表盘上。此外,门磁和窗磁等

方面采用的也是磁性传感器,机器人的智能化和精准度也需要磁性传感器做支撑。

模拟类传感器,主要应用在智慧医疗设备上,可以作为心跳、心电图等信号的输入,并将健康数据进行可视化的输出,让用户了解自身第一手健康、运动数据。

红外传感器常应用于红外摄像头、扫地机器人等智能家居方面。

## 2 智能传感器的技术研究进展

一个真正意义的智能传感器应具有如下功能:1) 自校准、自标定和自动补偿功能;2) 自动采集数据、逻辑判断和数据处理功能;3) 自调整、自适应功能;4) 一定程度的存储、识别和信息处理功能;5) 双向通信、标准数字化输出或者符号输出功能;6) 算法判断、决策处理的功能。下面以常用的温度、压力、惯性、生化和RFID传感器为例,介绍智能传感技术的研究进展。

### 2.1 智能温度传感器

温度传感器的发展大致经历了以下3个阶段:传统分立式温度传感器、模拟集成温度传感器和智能温度传感器。进入21世纪后,智能温度传感器正朝着高精度、多功能、总线标准化、高可靠性及安全性、开发虚拟传感器和网络

收稿日期:2016-08-15;修回日期:2016-09-05

作者简介:尤政,教授,中国工程院院士,研究方向为微纳技术及其空间应用,电子信箱:yz-dpi@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式:尤政. 智能传感器技术的研究进展及应用展望[J]. 科技导报, 2016, 34(17): 72-78; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.17.010

络传感器、研制单片测温系统等方向迅速发展。目前的智能温度传感器包含温度传感器、A/D转换器、信号处理器、存储器和接口电路,有的产品还带有多路选择器、中央控制器、随机存取存储器和只读存储器。智能温度传感器的特点是能输出温度数据及相关的温度控制量,适配各种微控制器,并且是在硬件的基础上通过软件实现测试功能,其智能化程度取决于软件开发水平。

#### 1) 提高测量精度和分辨率。

最早的智能温度传感器始于20世纪90年代中期,采用8位A/D转换器,其测温精度较低,分辨率只能达到1℃。目前,国外已相继推出多种高精度、高分辨率的智能温度传感器,使用9~12位A/D转换器,分辨率可以达到0.5~0.625℃。由美国Dallas半导体公司新研制的DS1624型高分辨率智能温度传感器,能输出13位二进制数据,分辨率高达0.03℃,测温精度为±0.2℃。为了提高多通道智能温度传感器的转换速率,也有的芯片采用高速逐次逼近式A/D转换器。以AD7817型5通道智能温度传感器为例,它对本地传感器、每一路远程传感器的转换时间分别仅为27 ms、9 ms<sup>[1]</sup>。在高精密温度测量方面,有学者设计了高性能数字温度传感器,该传感器由石英音叉谐振器,数字接口电路和基于现场可编程门阵列的传感器重置控制算法构成,传感器的灵敏度可以达到10<sup>-6</sup>℃的数量,即测温分辨率为0.001℃,响应时间1 s,测量精度为0.01℃<sup>[2]</sup>。

#### 2) 增强测试功能。

新型智能温度传感器的测试功能不断增强。智能温度传感器都具有多种工作模式可供选择,主要包括单次转换模式、连续转换模式、待机模式,有的还增加了低温极限扩展模式。对于某些智能温度传感器,主机(外部微处理器或单片机)还可通过相应的寄存器设定其A/D转换速率、分辨率及最大转换时间。另外,智能温度传感器正从单通道向多通道方向发展,这就为研发多路温度测控系统创造了良好条件。

#### 3) 总线技术的标准化与规范化。

目前,智能温度传感器的总线技术也实现了标准化、规范化,所采用的总线主要有单线(-Wire)总线、I<sup>2</sup>C总线、SMBus总线和SPI总线。

#### 4) 可靠性及安全性设计。

为了避免在温控系统受到噪声干扰时产生误动作,在一些智能温度传感器的内部,设置了一个可编程的故障排队计数器,专用于设定允许被测温度值超过上下限的次数。仅当被测温度连续超过上限或低于下限的次数达到所设定的次数才能触发中断端口,避免了偶然噪声干扰对温控系统的影响。

为了防止因人体静电放电而损坏芯片,一些智能温度传感器还增加了静电保护电路,一般可以承受1~4 kV的静电放电电压。例如TCN75型智能温度传感器的串行接口端、中断/比较信号输出端和地址输入端均可承受1 kV的静电放电电压。LM83型智能温度传感器则可承受4 kV的静电放电电压。

### 2.2 智能压力传感器

智能压力传感器是微处理器与压力传感器的结合,因此它们的实现途径可以分为:非集成化智能压力传感器、集成化智能压力传感器和混合型智能压力传感器。

非集成化的智能压力传感器是把传统的压力传感器、信号调理电路、带数字总线接口的微处理器组合成一体智能压力传感器系统。这种非集成化的压力传感器实际上是传统压力传感器系统上增加了微处理器的连接。因此,这是一种实现智能压力传感器系统最快的途径和方式。

集成化智能压力传感器是将压力敏感元件与信号处理、校准、补偿、微控制器等进行单片集成,主要采用微机电系统(MEMS)技术和大规模集成电路工艺技术,利用硅作为基体材料制作敏感元件、信号调理电路、微处理单元,并集成在一块芯片上。随着微电子技术的飞速发展以及微纳米技术的应用,由此制成的智能压力传感器具有微型化、结构一体化、精度高、多功能、阵列式、全数字化、使用方便、操作简单等特点。

混合式智能压力传感器是根据需

要与可能,将系统各个集成化环节,如敏感单元、信号调理电路、微处理器单元、数字总线接口,以不同组合方式集成在2~3块芯片上,并封装在一个外壳中。混合集成实现智能化是一种非常适合当前技术发展的智能化途径。

在智能压力传感器系统中,微处理器能够按照给定的程序对传感器实现软件控制,把传感器从单一功能变为多功能。智能压力传感器一般具有以下基本功能<sup>[3]</sup>。

1) 数据处理功能。智能压力传感器不仅对各个被测参数进行测量,而且根据已知被测测量参数,能够自动调零、自动平衡、自动补偿等。

2) 自动诊断功能。这是智能压力传感器的主要功能,智能压力传感器通过其故障诊断软件和自检软件,自动对传感器和系统工作状态进行定期和不定期的检测、测试,及时发现故障,协助诊断发生故障的原因、位置,并给予操作提示。

3) 软件组态功能。智能压力传感器由于采用了微处理器,所以不仅有必要的硬件组成,例如检测、放大、A/D、D/A、通信接口等,而且还有软件资源用于控制和处理数据。在智能压力传感器中,设置有多模块化的硬件和软件,用户可以通过微处理器发送命令,完成不同的功能,增加了传感器的灵活性和可靠性。

### 2.3 智能惯性传感器

惯性传感器,是MEMS传感器中得到最广泛应用的一类传感器,包括加速度计、陀螺仪和方位传感器。MEMS技术得天独厚的优势实现了惯性传感器的小型化并且降低了成本。现在的惯性测量模块(IMU)可以在10 mm×10 mm×4 mm的尺寸内,集成三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁强计,而成本在1美元以内<sup>[4]</sup>。这种惯性测量模块可应用于智能手机、可穿戴设备上,实现包括步态监测、步数统计、跌倒检测、睡眠监测、室内导航等运动、健康方面的功能,同时也可以实现手势识别、方向感知等娱乐方面的功能<sup>[5]</sup>。

1) 更小、更灵活、更节能、高性能、



高集成。

应用于可穿戴设备上的智能惯性传感器,需要具有更小的尺寸,更低的功耗,作为体域网的一个节点实现数据的无线传输,最终实现柔性化。目前全球最小的三轴加速度计是博世公司在2014年发布的BMA355,采用晶圆级封装,尺寸仅为1.2 mm×1.5 mm×0.8 mm,功耗极低,工作电流仅为130  $\mu$ A,而在低功耗模式下,电流可降低到1/10。此外,BMA355还具有强大的智能终端引擎,中断模式包括数据就绪同步、运动唤醒、敲击感测、方向识别、水平和竖直切换开关、低 $g$ 值/高 $g$ 值冲击检测、自由落体检测、节电管理等,可用于健康追踪器、计步器(智能手表和手环)、珠宝首饰等可穿戴设备<sup>[6]</sup>。

除了可穿戴设备的应用外,惯性传感器在军事领域也有着广阔的应用和前景,不同于可穿戴设备上的要求,军事方面的应用对传感器精度、可靠性以及在极端条件下的稳定性提出了更高的要求。

惯性传感器,利用质量块的惯性来对待测量进行测量,而MEMS传感器质量块小,以陀螺仪为例,其精度一般不如传统陀螺,在航空、航天等高端领域难以被直接应用。根据现阶段的工艺水平,采用单个MEMS陀螺的精度已经接近现阶段的极限,需要通过新的方法来提高MEMS陀螺仪的精度。

## 2) 多传感器集成与数据融合。

考虑到MEMS传感器体积小、成本低,可以利用多传感器集成与数据融合技术来提高精度,即通过多个传感器的信息融合实现优于单个传感器的性能。NASA在2003年提出了虚拟陀螺的概念,即使用多个MEMS陀螺组成阵列,对同一信号进行冗余检测并输出多个检测值,采用数据融合技术对这些检测值进行分析综合,将陀螺阵列融合成一个虚拟陀螺,得到对输入角速率的最优估计值,大大提高了陀螺精度。其后,西北工业大学的微纳实验室对3个零偏稳定性为35.00( $^{\circ}$ )/h的微陀螺进行滤波处理,得到的虚拟陀螺漂移性能提高了200多倍<sup>[7]</sup>,论证了虚拟陀螺概

念的可行性,也为采用阵列化传感器提高精度提供了新方法、新思路。

## 3) 新的敏感机理。

提高现有MEMS传感器性能的另一个方法是发现新的敏感机理。西北工业大学的微纳实验室在2015年展示了世界第一个基于模态局部化的谐振式加速度计<sup>[8]</sup>。改变了传统谐振式加速度计通过检测谐振频率变化敏感加速度的方式,而是通过检测2个弱耦合谐振器振幅比的变化敏感加速度,将灵敏度提升300倍,为高精度惯性传感器的研制开辟了一条新的道路。同时,该课题组基于强迫热对流现象设计出了一种多轴惯性传感器“射流转子陀螺”<sup>[9]</sup>,最多可以同时敏感3个方向的角度速度与3个方向的线加速度。利用流体粒子代替固体质量块,也开创了一个相对较新的MEMS研究领域。流体惯性传感省略了可动部件,具有器件结构简单和稳定性高的特点。

随着敏感机理的新发现、微机电技术的发展以及新型材料的应用,MEMS惯性传感器将进一步实现种类的多样化与精细化<sup>[10]</sup>,在可穿戴设备等消费电子产品、惯性导航及自动控制的军用领域发挥更加重要的作用。

## 2.4 射频识别技术

射频识别技术(RFID),是利用无线电信号进行自动识别特定目标并读写相关数据的通信技术,无需识别系统与特定目标之间建立机械或光学接触。按照标签有源与否可分为无源标签、半无源标签和有源标签。无源标签又称为被动式标签,从RFID读取器的询问无线电波中获得能量。而有源标签,又称为主动式标签和半无源标签,均具有内部电源,可在距离RFID读取器数百米的范围被识别。两者的区别在于有源标签无需读取器提供能量便可发射信号,而半无源标签仍依赖读取器提供的能量发射信号。与条形码相比,RFID标签被识别时不需要在读取器的视线内,所以RFID技术可嵌入被识别物体内部。RFID是智能识别和数据采集(AIDC)的一种方法,也是物联网(IoT)的重要组成部分,主要应用在国

防与安全、身份识别、环境、交通运输、医疗健康、农业与畜牧业等领域<sup>[11]</sup>。

RFID的核心技术包括RFID天线技术、数据的完整性与安全性、RFID中间件技术以及RFID的标准体系<sup>[12]</sup>。近年来,RFID的研究热点主要集中在数据的完整性与安全性,比如在获取信息的同时保证用户的隐私不被泄漏,含有RFID标签的物品所有权改变时的隐私保护<sup>[13-14]</sup>以及利用RFID技术实现其他领域的应用,如基于RFID技术的室内定位等<sup>[15]</sup>。

## 2.5 智能化传感器

生化传感器是指能够感应生物化学量,并按照一定规律转化为有用信号输出的器件<sup>[16]</sup>,一般由两部分组成,其一是生化分子识别元件,由具有生物分子识别能力的敏感材料组成,随着材料科学的发展,由二维新材料形成的生化敏感膜体现出了更加优越的性能<sup>[17]</sup>,也逐渐成为了生化分子识别元件研究领域的热点;其二是信号转换器,主要是由电化学或光学检测元件组成,如电流电位测量电极、离子敏场效应管等。随着当前新材料、新原理以及新集成技术的不断发展,特别是MEMS技术、生物芯片(bio-chip)技术的出现,目前生化传感器的研究已经逐渐发展为以微型化、集成化、智能化为特征的生化系统研究。在过去,传感器研究仅仅专注于提升自身性能,如灵敏度、动态范围、响应时间、可靠性等,而随着MEMS技术与标准CMOS技术的不断融合,传感器与读出电路的集成已成为可能,并且随着混合集成技术的不断进步,更多的功能电路,包括将通信模块、能量收集、电源管理模块集成于智能生化传感器当中,为传感器的微型化、多功能化以及智能化奠定了技术基础。

为了真正实现传感器的微型化与智能化,生物传感器需要与有源电路相集成,形成多功能化的片上系统。随着新材料、新结构、新原理的不断发展,基于悬臂梁的DNA传感器<sup>[18]</sup>、基于多晶硅纳米线的蛋白质/DNA传感器<sup>[19]</sup>、基于水凝胶的血糖传感器<sup>[20]</sup>、基于离子敏场效应管的pH值传感器<sup>[21]</sup>及基于带隙

基准的温度传感器<sup>[22]</sup>已经可以与其相应的读出电路、无线通信等模块,集成于同一芯片上,具备自校准功能,并可在一定范围内实现自调整、自适应功能。在实际应用中,多个生化信号往往需要同时检测,这就需要一个多传感器的片上系统,利用不同的检测原理实现多信号的同时检测。多传感器片上系统的实现为IC后道工艺设计提出了诸多挑战,由于布局多传感器的芯片要经过多次后道工艺,则所有工艺必须与标

准CMOS工艺兼容,并且后道工艺也要相互兼容。近年来许多研究专注于攻克混合集成中的难点,也取得了许多成果,如图1所示为一种无线可重构多传感器片上系统原理,为实现实时监测多个生理参数,4种生化检查中常用的传感器(包括基于多晶硅纳米线的蛋白质传感器、基于水凝胶的血糖传感器、基于离子敏场效应管的pH值传感器以及基于带隙基准的温度传感器)被集成于同一芯片上<sup>[21]</sup>。为实现智能多传感器

的微型化,模拟电路部分采用可重构的多传感器接口、可编程增益放大器以及10位SAR ADC的结构,显著缩小了芯片面积。此外,为实现智能传感器的能量自给,2种能量收集方式被同时采用(包括砷化镓太阳能电池采集光能以及电磁耦合方式采集射频能量),从而解决了医疗器件在长期使用或植入应用场景中,更换电池的问题。利用可重构电路降低功耗以及使用能量收集方法延长电池寿命,也已成为智能生化传感器研究的热点。图2为可重构多传感器片上系统显微照,芯片采用TSMC 0.35  $\mu\text{m}$  CMOS工艺以及必要的后道工艺制作,芯片面积为3 mm $\times$ 3.75 mm,实测性能参数见表1。

以上所述智能生化传感器及其电子电路,仍使用以硅材料为主的硬质电子材料制作。随着可穿戴传感器的发展,传感器直接接触人体肌肤的部分,已逐渐使用轻质柔性材料作为衬底,以消除器件穿戴的异物感。可穿戴式传感器具有诊断及监测功能,可监测包括生理、生化信号以及动作感应<sup>[23]</sup>。生理、生化信号监测有助于对神经疾病(如癫痫)、心血管疾病(如高血压)、肺部疾病(如哮喘)等进行诊断,并对治疗过程进行不间断的监测。对重要生命体征(如心率及呼吸速度等)的不间断监测,可以为慢性疾病的早期诊断及临床干预提供重要数据支持。这一系列可穿戴传感器的不断推广,也为未来远程医疗诊断系统的建设提供了终端硬件基础。目前,可穿戴智能传感器已经可以实现上述多生理、生化参数的提取,传感器及其外围电路均可集成于轻质柔性衬底,2016年国际固态电路会

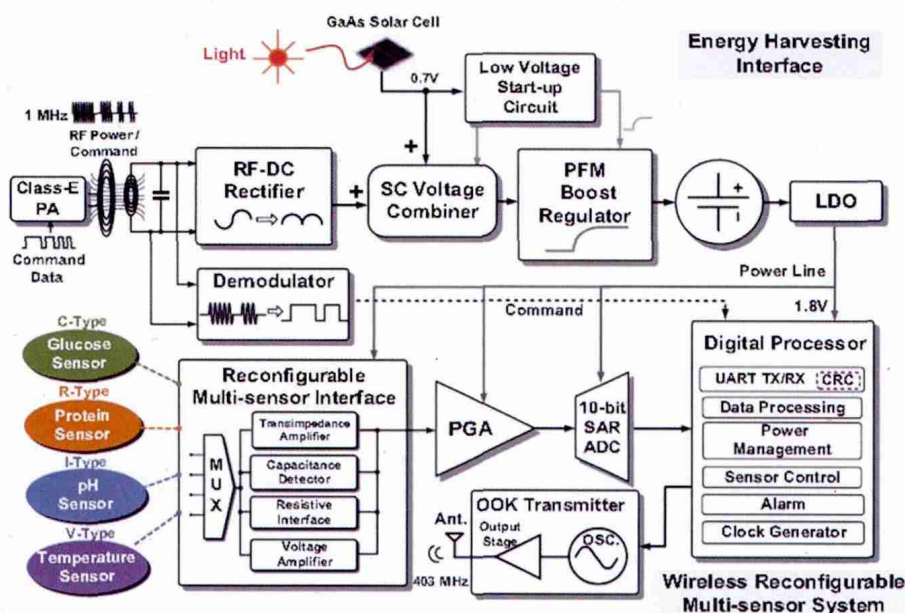


图1 无线可重构多传感器片上系统

表1 无线可重构多传感器片上系统性能参数

Technology							TSMC 2P4M 0.35 $\mu\text{m}$ CMOS process	
Supply voltage							1.8 V	
On-chip sensors							10-bit SAR ADC	
Sensitivity	Glucose	Protein	pH value	Temp.	ENOB	9.4-bit		
	69 mV/mM	6.8 % @ 300 fM	600 mV/pH	3.78 mV/ $^{\circ}\text{C}$	Sample rate	100 Ksps (Max.)		
Power	NA	144 $\mu\text{W}$	0–2.34 $\mu\text{W}$	3.78 $\mu\text{W}$	Power	10.26 $\mu\text{W}$		
Reconfigurable multi-sensor readout							OOK transmitter	
PGA Gain	0–40 dB (7-bit resolution)				Carrier frequency	403 MHz		
$F_s$	200 Hz (sample frequency)				Output power	–18 dBm		
Power	2.57 $\mu\text{W}$ (interface + PGA)				Power	762 $\mu\text{W}$		
Noise	769 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (overall input referred)				Digital processor			
Input type	Capacitance	Resistance	Current	Voltage	LFP BW	10/40 Hz		
Interface	53.4 mV/pF	91.8 mV/k $\Omega$	293 mV/nA	1.23 V/V	Power	2.34 $\mu\text{W}$ (normal)		
Conv. gain						2.6 $\mu\text{W}$ (alarm)		
Linearity ( $R^2$ )	0.9999	0.9959	0.9999	0.999	Bias circuit & buffer			
Energy harvesting interface							Power	15.6 $\mu\text{W}$
Max. Efficiency ( $\eta$ )	Voltage combiner	PFM booster	Entire		Total power consumption: 942.9 $\mu\text{W}$			
	92 % @ 10 k $\Omega$	82 % @ 1 k $\Omega$	73 % @ 1 k $\Omega$					

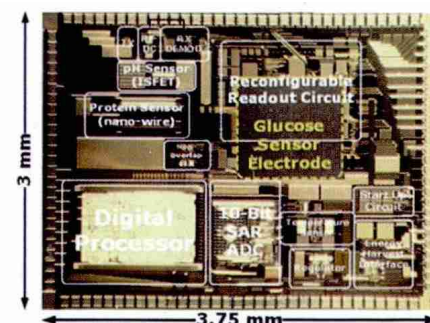


图2 可重构多传感器片上系统显微照片



议(ISSCC)展示了这一领域的最新研究成果。一种新的血氧饱和度及生物电信号检测传感器系统如图3所示<sup>[24]</sup>,有机光电二极管(OLED)、有机光检测器(OPD)、生物电信号电极、以及包含肢体通信(body channel communication, BCC)电路的片上系统,被混合集成于柔性PET衬底上,整体面积为 $2.5\text{ cm} \times 5.5\text{ cm}$ ,包含电池质量为 $2\text{ g}$ ,系统功耗为 $141\text{ }\mu\text{W}$ 。该智能传感器光学检测部分,具有自校准回路,系统具有自动数据采集和数据处理能力,传感器节点所采集到的血氧饱和度数据以及心电信号数据,通过肢体通信(BCC)收发器传输至中枢传感器,另外,时钟信号由中枢传感器发送至各传感器节点,从而去除了各节点外接的片外晶振,该系统构架在实现传感器间双向通信的同时,提高了系统的集成度。目前在可穿戴传感器的研究中,已经可以实现自校准、自动采集、双向通信等智能传感器的基本功能,如何提高复杂检测环境下多信号采集过程中的同步精度成为了研究热点。2016年,欧洲微电子研究中心(IMEC)与三星电子共同展示了一种多参数生理信号记录平台,其内置了并发心电(ECG)、生物阻抗(BIO-Z)、皮肤电流反应(GSR)以及光电容积描记(PPG)脉搏波传感器,实现了多参数同步采集,该系统可以为可穿戴电子产品提供更精确、更可靠以及更广泛的

健康评估<sup>[25]</sup>。因为多传感器使用同一芯片进行数据采集,使数据流之间可以实现高精度同步,从而为多数据之间相关性分析以及数据融合提供了基础。例如可以结合ECG和PPG数据分析脉搏到达时间,并进一步估计血压值<sup>[26]</sup>;结合ECG、PPG和BIO-Z数据可以对血氧动力学参数进行更为精确的估计等。这种多参数同步采集系统可以为未来的数据分析提供更为精确的时序数据,为更多的生化参数估计计算提供了基础,是智能传感器的研究热点和未来发展必然趋势。

### 3 智能传感器的市场应用

传感器在市场应用方面,既可以助推传统产业的升级,例如传统工业的升级、传统家电的智能化升级;又可以对创新应用进行推动,比如机器人、VR/AR(虚拟现实/增强现实)、无人机、智慧家庭、智慧医疗和养老等领域。

#### 3.1 对传统产业升级的助力

##### 1) 推动传统工业的转型升级。

在工业领域,传统企业面临人力成本提高、市场需求下降等问题,传统企业开始从劳动密集型转向自动化、智能化。在整个转型中,传感器发挥着至关重要的作用,助力“中国制造”转向“中国智造”。

要提升工厂效能,需要在生产线上增加传感装置,进行产品、工序的全程

追踪,同时利用机械臂、自动导航车系统等具有传感装置的设备加快生产速度、精度,全方位提升生产制造效率。

##### 2) 助力家电行业的智能化升级。

近几年,家电企业业绩下滑严重。据工业与信息化管理部相关数据显示,2015年家用电子电器产品的出口总金额同比下滑 $0.6\%$ ;家电进口总金额同比下滑 $5\%$ 。当前,如何寻找新的增长点、扭转业绩下滑的局面,是家电行业面临的一大考验。

为此,传统家电企业开始将家电进行智能化升级,相继推出智能冰箱、智能空调、智能洗衣机、智能烤箱、扫地机器人等产品,满足用户对家用电器的个性化需求。

在智能家电的智能表现上,例如,智能洗衣机通过水位传感器实现洗衣机的智能化;智能烤箱则会通过温度传感器等实现简便、智能的烘焙体验;扫地机器人通过可调位移传感器做支撑,实现机器人的智能精准操作。

家电产品种类繁多,今后对传感器也有多样性的需求,像运动类传感器、听觉类传感器、视觉类传感器、麦克风阵列、温度/湿度传感器等,大家电和小家电都会用到。因此,可定制的、参数可调的传感器将会更加有力的支撑家电产品的各种应用场景。

##### 3) 有望为手机业带来转机。

众所周知,全球手机业已经进入饱和状态。中国智能手机市场GFK预测,2016年手机市场增长仅约 $3.1\%$ 。手机业能否迎来转机,很大程度上取决于传感器的发展。

从目前智能手机的功能而言,还远未能满足人们对手机的想象。借助传感器,手机可以变得更加人性化、智能化。比如,嗅觉传感器、味觉传感器,以及实现真正灵敏的运动追踪的磁性传感器,都可以使手机功能更加强大。

可以肯定地说,当各种类别的传感器达到成熟时,手机业将会出现新的发展契机。

#### 3.2 对创新应用的支撑

在传感器的创新应用中,最为典型的是机器人、虚拟现实/增强现实(VR/

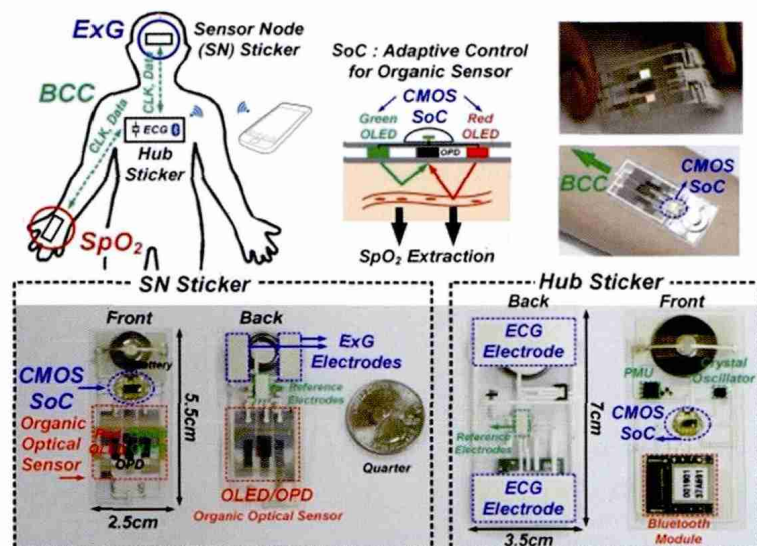


图3 血氧饱和度及生物电信号检测系统

AR)、无人机等新型应用领域。

### 1) 虚拟现实和增强现实。

当下,虚拟现实(VR)和增强现实(AR)可谓是最为热门和最受关注的应用领域之一。这两项技术之所以如此吸引眼球,在于VR虚拟现实能够给人身临其境的感受,AR增强现实可以让人对现实的体验更加形象、强烈和直观。而这些感受,离不开传感器的支撑。

在传感器的应用上,VR/AR硬件会用到九轴陀螺仪、红外定位传感器、眼球追踪传感器以及手势识别传感器等,可以获取使用者的动作、姿态和加速度等信息。未来,将会用到生物传感器。比如,子女去旅游时,在家里的老人搭配上带有生物传感器的体感设备,也能获得与子女旅游的同样体验。

VR和AR已应用到游戏、体育、教育、旅游、影院、医疗等领域。随着VR和AR应用领域的不断延伸,传感器的应用需求将非常巨大。

### 2) 机器人。

机器人,是一种可编程和多功能的操作机,或是为了执行不同的任务而具有可用电脑改变和可编程动作的专门系统,一般由执行机构、驱动装置、检测装置和控制系统和复杂机械等组成。谷歌AlphaGo战胜国际围棋大师的事件,引发了全球对于机器人的关注。在机器人里面,需求诸多传感器,包括对周围环境、对姿态的测试及人机互动方面。机器人需要用到大量、不同类别的传感器,并对传感器的性能也提出很高要求。

机器人应用十分广泛,如养老产业、工业、服务业、教育业等。如果传感器做得好,机器人产业就可以飞起来,将助力养老、工业等诸多领域的发展。

### 3) 无人机。

无人机在短时间内得到快速发展。据统计,今年无人机的出货量将达到500万台,明年将突破1000万台。

在无人机的高度集成化和智能化中,传感器发挥着至关重要的作用。无人机中会应用到陀螺仪、红外、超声、激光、摄像头、气压、地磁等传感器,从而实现无人机技术化的平稳控制和辅助

导航,以及人性化的避障、识别、跟踪等智能控制。

## 4 智能传感器的未来发展

### 4.1 传感器走向集成化

为了开辟更为开阔的发展空间,MEMS传感器开始走向集成化。目前,一些企业开始开发集成传感器,比如将麦克风与气压传感器进行集成,将气压传感器与温湿度传感器进行集成,将麦克风与温湿度传感器进行集成等。

传感器集成化有几个优势:一是实现产品功能更加强大,满足多样化需求;二是成本优势,1个集成传感器比2个单独的传感器更加具有成本优势。三是降低尺寸,可以满足更多可穿戴式智能产品的发展需求。

### 4.2 无线能量采集

传统传感器存在诸多制约因素,最为突出的是供电方式。传统传感器主要通过电池或电力线供电,这种供电方式除了存在布设成本外,还会有定期维护和更换成本。此外,可穿戴产品的大小也对传感器的尺寸提出更高要求。

对此,无线能量采集成为传感器下一个发展方向。无线能量收集技术,是指把环境中的能量比如光、动能、热能等转换成电能来给系统供电的技术,实现传感器的自供电,这样传感器可以被安置在任何地方,也减少更换和维护的成本。目前,已有国外企业推出相应的解决方案,并表示传感器能够持续工作达10年以上。

今后,随着应用的不断推进,传感器还会与人工智能技术相结合,传感器将不是冷冰冰的器件,而会变成一个更加智能、更有温度的产品。

### 4.3 算法和方案

随着细分应用需求的增多,传感器之上的软件算法和方案重要性越来越凸显。

在算法上,比如生物传感器在医疗健康产业上的应用。在心电算法上,除了心率、心脏负荷率、压力、睡眠指数等,还包括通过FDA认证的医疗应用。

此外,依托传感器的解决方案开始不断推出。一些传感器企业开始提供

检测身体健康状况的解决方案,并与保险公司进行合作。具体而言,健康设备中的传感器可以监测出用户身体状况,保险公司将这些健康设备赠送给用户,从而获得用户的健康信息,并根据健康数据来设定用户参保的额度,从而降低保险公司损失,并实现利益最大化。

### 4.4 中国传感器产业要抓住历史机遇

传感器行业入门门槛高、壁垒高;投资大、风险大。在传感器领域,全球具有原创力、产品体量大的国家,主要集中在美国、德国、意大利和法国。

相比之下,中国传感器产业存在一些不足:在传感器核心技术积累如材料、设计、工艺方面严重缺失。MEMS企业规模相对较小,拥有完全核心自主设计和IP的MEMS企业年销售额都未超过1亿美元,MEMS制造端的产业链成熟度不高,产学研结合的平台相对不成熟。

随着智能时代的出现,传感器产业恰逢一个难得的历史机遇。抓住这一历史机遇,传感器将会迎来一个新的发展高度。对中国传感器产业而言,担负着重大的责任,也面临着重大的挑战。为此,中国需要在以下方面寻找突破口:提高传感器精度,提高小批量-低成本量产能力,多材料复合技术,电池技术和无线无源传感器、封装测试设备和系统、加工设备和耗材国产化等。同时,建立智能传感器产业大生态圈,即不仅需要器件,而且需要有测试、加工等环节。通过强大产业生态圈,提升中国智能传感器产业水平。

## 5 结论

智能传感器的研究方向,一方面是探索新材料、新原理、新技术以提高传感器自身性能;另一方面,随着传感器工艺与标准CMOS工艺的融合,微型化、多功能化及智能化将是未来发展的必然趋势。中国应该抓住智能时代带给传感器产业发展的历史机遇,全面提升智能传感器的基础研究和产业化水平,为智能时代的到来提供有力的技术支持。



## 参考文献 (References)

- [1] 沙占友. 智能温度传感器的发展趋势[J]. 电子技术应用, 2002, 28(5): 6-7.
- [2] 徐军, 尤波, 李欣, 等. 应用石英音叉谐振的智能温度传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(6): 1453-1459.
- [3] 高伟. 浅谈智能压力传感器[J]. 科技领域, 2014(2): 413.
- [4] 赵正平. 典型MEMS和可穿戴传感技术的新发展[J]. 微纳电子技术, 2015(1): 1-13.
- [5] Buke A, Gaoli F, Yongcai W, et al. Healthcare algorithms by wearable inertial sensors: A survey[J]. China Communications, 2015, 12(4): 1-12.
- [6] Colin R J. Bosch unveils consumer MEMS[EB/OL]. [2016-07-31]. [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1262945](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1262945).
- [7] 张鹏, 常洪龙, 苑伟政, 等. 虚拟陀螺技术研究[C]//中国微米/纳米技术学术年会. 南京: 中国仪器仪表学会, 2006: 2226-2229.
- [8] Zhang H M, Yuan W Z, Li B Y, et al. A novel resonant accelerometer based on mode localization of weakly coupled resonators[C]//18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Alaska: IEEE, 2015: 1073-1076.
- [9] Chang H, Gong X, Wang S, et al. On improving the performance of a triaxis vortex convective gyroscope through suspended silicon thermistors[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(2): 946-955.
- [10] 陈尚, 张世军, 穆星科, 等. MEMS陀螺技术国内外发展现状简述[J]. 传感器世界, 2016, 22(4): 19-23.
- [11] Jung K, Lee S. A systematic review of RFID applications and diffusion: Key areas and public policy issues[J]. Journal of Open Innovation Technology Market & Complexity, 2015, 1(1): 1-19.
- [12] 黄玉兰. 物联网射频识别(RFID)技术与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [13] Dimitriou T. Key evolving RFID systems: Forward/backward privacy and ownership transfer of RFID tags[J]. Ad Hoc Networks, 2016(37): 195-208.
- [14] Sharma M, Agrawal P C. A Research Survey: RFID security & privacy issue[C]//International Conference on Computer Science. Morelia, Mexico: International Conference on Computer Science, 2013: 255-261.
- [15] Zheng J, Qin T, Wu J, et al. RFID indoor localization based on relational aggregation[C]//2016 Eighth International Conference on Advanced Computational Intelligence. Chiang Mai: IEEE, 2016: 41-44.
- [16] 崔大付, 刘长春, 陈翔萌. 发展中的生化传感器[J]. 传感器世界, 2004, 10(3): 6-11.
- [17] Zhao Y, Li X, Zhou X, et al. Review on the graphene based optical fiber chemical and biological sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016(231): 324-340.
- [18] Huang Y J, Huang C W, Lin T H, et al. A CMOS cantilever-based label-free DNA SoC with improved sensitivity for hepatitis B virus detection[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits & Systems, 2013, 7(6): 820-831.
- [19] Huang C W, Huang Y J, Yen P W, et al. A fully integrated hepatitis B virus DNA detection SoC based on monolithic polysilicon nanowire CMOS process [C]//2012 Symposium on VLSI Circuits. Hawaii: IEEE, 2012: 124-125.
- [20] Kuo P H, Lu S S, Kuo J C, et al. A hydrogel-based implantable wireless CMOS glucose sensor SoC[C]//2012 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Seoul: IEEE, 2012: 994-997.
- [21] Huang Y J, Tzeng T H, Lin T W, et al. A self-powered CMOS reconfigurable multi-sensor SoC for biomedical applications[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(4): 851-866.
- [22] Meijer G C M, Wang G, Fruett F. Temperature sensors and voltage references implemented in CMOS technology[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(3): 225-234.
- [23] Bonato P. Wearable sensors and systems[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2010, 29(3): 25-36.
- [24] Lee Y, Lee H, Jang J, et al. 22.3 A 141  $\mu$ W sensor SoC on OLED/OPD substrate for SpO<sub>2</sub>/ExG monitoring sticker[C]//2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco: IEEE, 2016: 384-385.
- [25] Konijnenburg M, Stanzione S, Yan L, et al. 28.4 A battery-powered efficient multi-sensor acquisition system with simultaneous ECG, BIO-Z, GSR, and PPG[C]//IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco: IEEE, 2016: 480-481.
- [26] Mukkamala R, Hahn J O, Inan O T, et al. Toward ubiquitous blood pressure monitoring via pulse transit time: Theory and practice[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical engineering, 2015, 62(8): 1879-1901.

## Research progress and application prospect of smart sensor technology

YOU Zheng

Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** The research and application of varieties of smart sensors attract considerable attention as the smart life is coming. Smart sensors have powerful data processing capabilities beyond traditional sensors, providing more comprehensive functions. This paper introduced the research status and the leading products of several common smart sensors, such as temperature sensors, pressure sensors, inertial sensors, bio-sensors and RFID. The key role of smart sensors in the promising applications has been demonstrated, i.e., internet of things, virtual reality, robots, healthcare. Finally, the future developments of the smart sensors have been discussed.

**Keywords** smart sensor; MEMS; internet of things; industrialization

(编辑 傅雪)