

智能传感器技术应用现状与发展趋势综述

顾廷炜, 汤明宏, 孙晓冬

(中科芯集成电路有限公司, 江苏 无锡 214072)

摘要: 随着物联网、工业互联网、人工智能等新兴产业的不断发展, 对传感器的小型化、智能化和网络化等方面提出了更高的要求, 智能传感器技术作为实现万物互联的关键技术, 已经成为当前的研究热点。文中介绍了智能传感器的基本概念和功能特点, 分析了国内外智能传感器的产业链构成和发展现状, 描述了智能传感器在汽车电子、航空航天、国防军事等高可靠性要求领域的应用情况, 展望了智能传感器在未来的发展趋势, 并就国内智能传感器行业目前面临的问题提出了相应的对策和建议。

关键词: 智能传感器; 汽车电子; 航空航天; 国防军事; 人工智能; 物联网

中图分类号: TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 2095-1302 (2025) 01-0059-05

0 引言

传感器是一种用于感知外部信息的测量装置, 可以将物理、化学、生物等非电信号转换为易于精确分析的电信号。传感器是感知和获取外部信息的源头, 对于任何的测量和控制系统而言, 传感器都是第一要素, 其测试精度往往决定了整个系统的性能。随着科技的进步和发展, 传感器技术已被广泛应用于汽车电子、工业控制、消费电子、国防军事、航空航天等各个领域^[1]。

传感器技术的发展可分成3个阶段, 各个阶段对应的典型产品类型分别为结构型传感器、固体型传感器和智能型传感器。结构型和固体型的传统传感器通常只能把采集到的外部信号转换为模拟信号输出, 后续还需借助于其他电路模块进行信号传输和处理等操作。与传统传感器不同, 智能传感器可对采集到的原始信号进行分析处理、数据存储和远程通信, 并输出可供后续系统直接使用的数字信号, 有效提高了检测效率和智能化程度。智能传感器技术是一种正处于高速发展阶段的新兴技术, 汇集了微机电系统、信号处理、计算机、微电子、人工智能、现代控制等多种技术和理论^[2]。

目前, 全球智能传感器技术发展可谓日新月异, 基于新材料、新原理、新工艺的各类智能传感器层出不穷, 欧美、日韩等全球主要工业强国均已在智能传感器领域深耕多年, 发展十分迅速, 并形成了较高的技术壁垒。对于我国而言, 智能传感器技术俨然已经成为实现“制造强国”和“网络强国”建设目标的核心技术。基于此, 本文介绍了智能传感器的基本概念和发展现状, 综述了在汽车电子、航空航天、国防军

事等高可靠性要求领域中智能传感器的应用情况, 为智能传感器当前存在问题的解决提出了对策和建议, 最后展望了其未来的发展趋势。

1 智能传感器概念及发展现状

1.1 基本概念和功能特点

“智能传感器”这一概念最早由美国宇航局(NASA)在20世纪70年代末提出^[3]。在宇航员生活环境监测、科学实验以及飞船运动参数测量等活动中, 需要大量的压力、温湿度、气体体积分数传感器, 而这些传感器所产生和传输的数据量十分庞大, 远超当时大型计算机的处理能力。为提高数据处理效率、减小宇宙飞船载荷, NASA的工程师们创造性地将传感器和微处理器合二为一, 从而赋予了传感器一定的信息处理能力, 这就是智能传感器的雏形。

为提高智能传感器的兼容性, 电气与电子工程师协会推出了IEEE 1451标准协议^[4]。该协议指出智能传感器由具备信号调理功能的传感器、内嵌其中的校准补偿算法以及数字接口3部分组成, 能够进行数据通信, 实现标准化的物理连接。已有学者按照传感器的内部结构和功能特点, 把现有传感器划分成表1所列的5个代际, 从第3代开始正式迈入智能传感器的行列^[5]。

综上所述, 智能传感器是融合了传感器、微处理器、信号调理模块、存储模块、ADC模块、通信模块、智能算法等软硬件为一体的微型系统, 具备信号感知、信号处理、数据存储、自校准、自补偿、自诊断、人工智能、双向通信、数字信号输出等诸多功能。

1.2 产业链及行业发展现状

近年来, 随着新能源汽车、医疗健康、消费电子、智能制

收稿日期: 2023-12-18 修回日期: 2024-01-17

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20220228)

造等行业的迅猛发展，对智能传感器的需求与日俱增。全球越来越多的高校、研究所和高新技术企业投入到智能传感器行业，

其研究课题或业务覆盖了产业链中的研发、设计、制造、封装、测试、软件、芯片、应用等各个环节，具体如图 1 所示。

表 1 传感器的代际划分

分类	代际	内部结构	功能特点
传统传感器	第 1 代	只有敏感元件，不包含电路模块	将非电信号转换成微弱的模拟电信号输出
	第 2 代		构成传感系统的感知部分，可远程控制
	第 3 代	包含微机电系统 (Micro Electromechanical System, MEMS) 和信号调理模块	开始采用 MEMS 工艺，可进行信号调理
智能传感器	第 4 代	包含 MEMS、信号调理和数据处理模块、数字端口等	允许传感器寻址，可对自身状态进行评估
	第 5 代	包含多个 MEMS、微处理器以及数据存储、信号调理、数据处理、模数转换和数字端口等模块	具备指令和数据双向通信、数字信号传输、本地数据处理、自检测、自补偿、自定义算法等功能

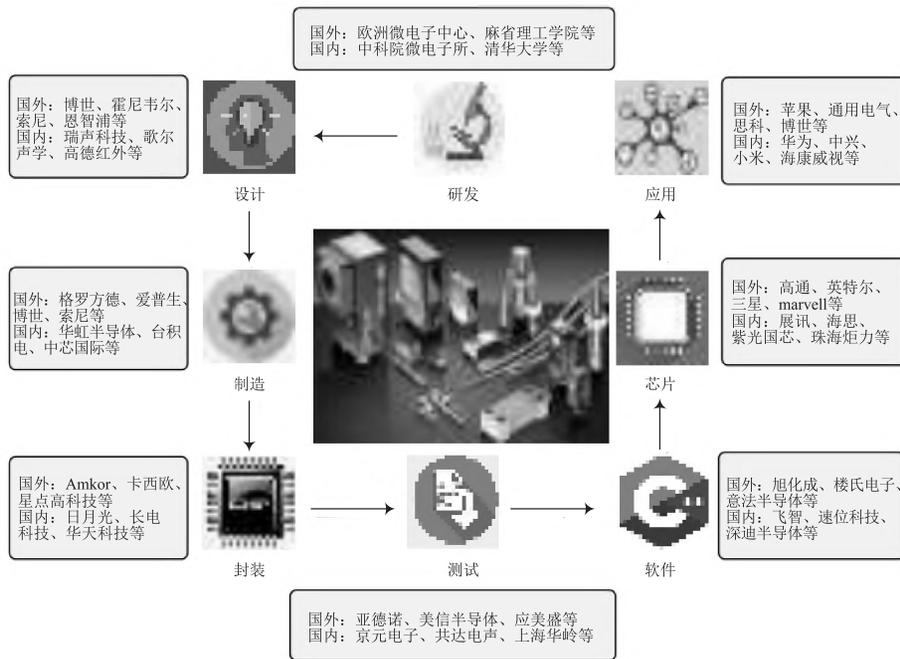


图 1 智能传感器产业链全景图

1.2.1 国外发展现状

美国、日本等主要制造业强国凭借雄厚的技术实力和完备的上下游产业链，在高端智能传感器市场占据着绝对的主导地位，而我国相关企业则缺乏核心技术，竞争力明显不足。

目前，除博世、霍尼韦尔等老牌传感器公司外，飞思卡尔、亚德诺等模拟器件厂商也开始涉足智能传感器行业。知名研究机构 TMR 对未来 10 年能够占据全球智能传感器行业主导地位的 15 家公司进行了预测，具体包括亚德诺、霍尼韦尔、美高森美、罗克韦尔、德州仪器、威世科技、欧姆龙、瑞萨电子、横河电机、英飞凌、博世、ABB 集团、伊顿公司、恩智浦、意法半导体，全部分布在欧美、日本等发达地区和国家。上述公司占据了我国智能传感器市场 70% 以上的份额，考虑

到传感器技术需要深厚的积累，未来很长一段时间内，全球智能传感器市场格局不会有太大变化。

1.2.2 国内发展现状

与美国、德国、日本等工业强国相比，我国在智能传感器领域的研究起步较晚，发展相对滞后。国内相关企业缺乏核心竞争力，尤其是在中高端智能传感器市场，基本上完全被博世、霍尼韦尔等老牌传感器厂商所垄断。考虑到智能传感器在国民经济建设，尤其是在高端制造业中发挥的关键作用，同时为了打破欧美等发达国家和地区的技术壁垒，近年来，我国陆续推出了《中国制造 2025》《智能传感器产业三年行动指南（2017—2019 年）》《基础电子元器件产业发展行动计划（2021—2023 年）》等一系列的扶持性政策和措施，以期早日解决智能传感器技术“卡脖子”问题^[6]。

在国家相关政策的扶持下，智能传感器的国产化率不断攀升、企业实力显著增强、专利申请数量也稳步增加，目前已初步形成一套完整的产业链体系。未来，随着国内企业技术水平和市场认可度的提高，我国智能传感器的市场规模和国产化率还会得到进一步提升。

2 智能传感器应用领域

近年来，随着物联网、智能制造、人工智能等产业的快速发展，智能传感器行业的市场规模和应用领域不断拓展，从最初的航空航天、军事工业等涉及国家重大工程和国防安全的专用领域，逐渐过渡到汽车工业、消费电子、工业生产、医疗保健等消费市场和民用领域。可以预见的是，随着智能化时代的来临，各类智能传感器的应用场景还会进一步地丰富，本文主要针对可靠性要求较高的汽车电子、航空航天、国防军事等领域重点展开阐述。

2.1 汽车电子

汽车电子是智能传感器应用最广泛的领域。车用传感器在全球传感器市场的规模占比高达32%，尤其是在毫米波、超声波和激光等雷达传感器细分领域，汽车行业的占比更是超过了80%。随着人工智能、物联网、5G通信等新一代信息技术的发展，智能网联汽车已经成为未来汽车行业发展的主流方向^[7]。

车用智能传感器可对车身状态信息和周围环境信息进行信号采集、数据处理和通信传输等操作，为汽车的中央决策系统提供有效的参考数据。目前，即便是在普通的汽车中，都集成有数百个各式各样的传统和智能传感器，而在具备智能驾驶辅助、人脸检测、自动泊车等功能的高级汽车中，传感器的总体数量以及智能传感器的占比更高。根据车用智能传感器监测对象的不同，可分为车身感知传感器和环境感知传感器2个大类，其具体类别和主要用途见表2。

表2 车用智能传感器分类和用途

监测对象	类别	用途
车辆自身信息	温度传感器	燃油、冷却液、尾气温度测量
	压力传感器	轮胎、燃油喷射、制动液压力测量
	速度传感器	发动机转速、车轮速度测量
	流量传感器	发动机瞬态和稳态进气量测量
	位置传感器	制动踏板、离合器位置测量
外部环境信息	视觉传感器	障碍物、车道线、标志、信号灯识别
	雷达传感器	车距车速测量、盲点检测、碰撞预警
	定位传感器	车辆精准定位、实时车速测量

车用智能传感器产业链可分为上游零部件和原材料供应

商、中游传感器制造商以及下游汽车生产商。目前，我国在车用智能传感器产业链的发展情况和所处地位如下：

(1) 产业链上游：对于经济附加值较高的芯片等核心部件，大多被国外供应商垄断，国产厂商主要聚集在电路板制作、外壳加工、原材料供应等低端领域。

(2) 产业链中游：国外制造商凭借强大的技术优势，基本垄断了车用智能传感器市场，国内厂商在油位传感器、尿素传感器、激光雷达等细分领域有一定话语权。

(3) 产业链下游：我国在传统的燃油汽车方面，主要依赖进口技术，缺乏核心竞争力。但是，随着新能源汽车的出现和发展，比亚迪、蔚来等一批具有自主知识产权的汽车厂商迅速崛起，有望实现弯道超车。

2.2 航空航天

航空航天领域是智能传感器的发源地，在飞行器的控制系统、动力系统、逃逸系统、着陆系统、舱内空间等关键部位，布满了各类传感器，用于对飞行器本身状态和周围环境的变化进行实时监测和预警。飞行器对体积、质量和功耗有着严格的限制和要求，相较于传统传感器，智能传感器具有微型化、轻量化、智能化、低功耗、便于组网等优势，可有效缓解飞行器的运载压力和中央处理系统的计算压力。

作为智能传感器概念的提出者，NASA多年来一直致力于智能传感器在航空航天领域的应用研究，并在高温无线智能传感器技术、宇航员的生命健康和周围环境的智能监测技术等方面取得了一定的成果^[8-9]。NASA所属的Glenn研究中心在2014年发布的科技报告中，介绍了其智能传感器和电子系统部门在高温碳化硅、MEMS、纳米、化学、薄膜等多种类型传感器（如图2所示）方面的研究工作。

NASA的Glenn研究中心在2020年发布的科技报告中，介绍了一种如图3所示的粘附型气体体积分数智能检测传感器，其尺寸与一张邮票相近。该智能传感器内部集成了3种传感元件、微处理器、信号调理电路、无线传输模块等，可对氧气、氢气、碳氢化合物气体（烃类）等多种气体的体积分数信息进行实时采集、处理和传输。

目前，国内航空航天领域研究与应用智能传感器的主要单位包括北京航天试验技术研究所、北京遥测技术研究所、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等^[10]。在上述科研院所和高校的努力下，我国航空航天传感器经历了从仿造到自研、从单品种到多类别、从低精度到高精度、从结构型到智能型的蜕变过程，研制的传感器产品涵盖了加速度、压力、温度、湿度、气体体积分数传感器，基本满足了我国航空航天各项任务的测试要求。但总体而言，目前我国航空航天领域的测试系统内部仍以传统传感器为主，智能化和网络化水平明显不足。

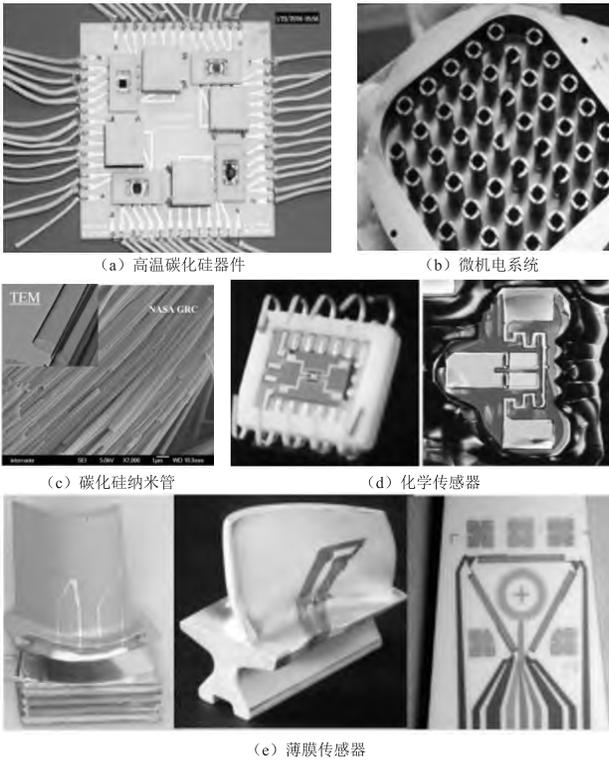


图2 NASA Glenn 研究中心传感器类型

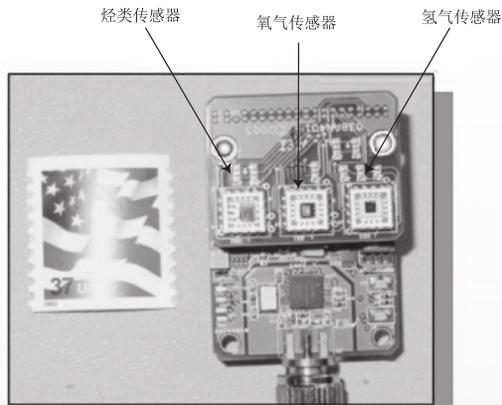


图3 粘附型气体体积分数智能检测传感器实物图

2.3 国防军事

在国防军事领域，传感器是获取武器装备及其内部系统相关信息的主要技术途径，被广泛应用于导弹、战斗机、军舰等武器装备中，并在引信、舵机、发动机、座舱等内部系统的实时监测和精准控制方面发挥了巨大的作用。为满足信息战、网络中心战等全新作战理念的需求，军用传感器已经逐渐向智能化、网络化、微型化方向发展。

近年来，随着智能传感器技术的发展，世界军事强国纷纷开展武器系统智能化研究工作。以美国为例，其国防部门从20世纪末开始，就十分重视军用智能传感器的发展。近年来，在美国国防部高级研究计划局（DARPA）的牵头下，

又开展了一系列军用智能传感器的研究工作^[11-12]，例如2015年启动的构建无人值守战场态势感知网络的“近零功耗射频与传感器”项目，以及2018年开始的用于探测全球海域和监视潜艇、潜航器的“持久海洋生物传感器”项目。

经过30多年的持续投入和不断发展，国外的军用智能传感器技术已经日臻完善，并在战斗机故障诊断、导弹制导和起爆控制、军用无人装备感知、战场态势实时监测等军事场景得到了实际应用，如图4所示。

目前，我国在智能传感器的应用方面，还局限于物联网、工业生产、消费电子等民用领域。根据相关报道，国内国防科学技术大学、解放军理工大学、中国电子科学研究院等单位已开始关注智能传感器在军事领域的应用，并将智能传感器用于导弹遥测系统、智能引信、惯性导航等军事场景^[13]。总体而言，智能传感器在我国国防军事领域虽有一定的应用，但多停留于理论研究或原理样机阶段，其成熟度和可靠性还无法满足实际战场环境的应用需求。

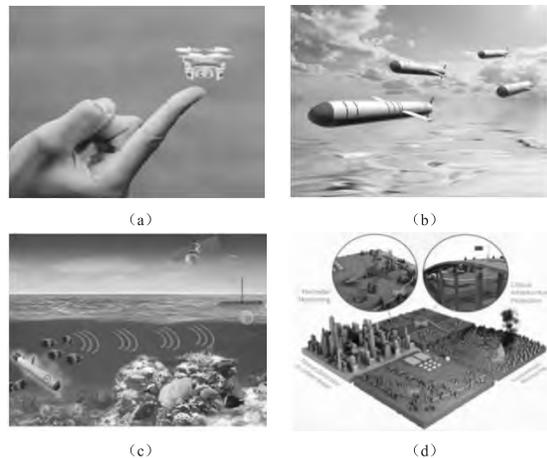


图4 国外智能传感器技术在军事场景中的应用

3 智能传感器发展趋势

智能传感器是传感器技术发展过程中的一次重大突破，未来将会朝着智能化、微型化、网络化、低功耗、多信息融合等方向发展^[14-15]。

(1) 智能化

智能化是智能传感器的本质特征之一，也是其与传统传感器相比的优势所在。未来，通过在智能传感器内嵌入数据融合、模式识别、神经网络等理论和算法，可以为敏感元件、微处理器、信号调理电路等模块赋予思想和灵魂，从而推动传感器从“智能感知”过渡到“自主认知”阶段。

(2) 微型化

随着微电子制造工艺、先进集成技术和材料科学的不断进步，智能传感器中的敏感元件、微处理器和其他各类电路模块的尺寸已经步入了纳米级，由此带来了产品应用、功能

性能、生产制造等多方面的优势。因此，微型化是智能传感器未来发展的必由之路。

(3) 网络化

智能传感器网络化是指多个具有无线通信和数据处理能力的传感器节点通过自组织的方式组建而成的分布式智能化测控系统，具有功耗低、成本低、覆盖范围广、即时性好等优点。

(4) 低功耗

为准确捕捉周边环境的变化情况，智能传感器需要时刻保持工作状态，因此，绝大部分电能最终都消耗在无用信息的监测和处理上。在供电难以保证的野外环境下，智能传感器的监测范围、工作时长和功能性能都受到了极大的限制。因此，低功耗也是未来智能传感器发展的一个重要方向，无人值守战场、无人机等应用场景对其有着很高的需求。

(5) 多信息融合

多信息融合指的是通过某种算法对多个传感器测得的信息进行整合处理，从而更为准确全面地反映周围环境或者被测目标的特征。以自动驾驶技术为例，仅凭单一传感器的测试数据难以对周围驾驶环境进行准确判断，因此，需要对摄像头、激光雷达、惯性单元等多个传感器的测试信息进行交叉融合，从而更好地辅助驾驶。就目前的发展趋势来看，多个传感器交叉使用的场景将会越来越多。因此，多信息融合将会成为未来智能传感器的发展方向之一。

4 结 语

智能传感器不仅是工业机器人、智能网联汽车、智慧医疗设备、消费电子产品等智能系统中的核心部件，更是未来智能时代的重要技术基础。但是由于我国智能传感器行业起步较晚、发展滞后、缺乏自主研发和技术创新能力，国内智能传感器仍然存在产业规模偏小、缺乏标杆企业、制造工艺落后、产品性能不足、国产化程度低、严重依赖进口、研发人员短缺、成果转化率低等诸多问题，这严重阻碍了我国社会生产的智能化进程。针对上述问题，需从国家层面、技术层面、国产化层面和人才层面等角度入手，通过统筹全国科技力量、建设共性技术平台、提升自主可控能力、培养创新型研究人才等方法予以解决。

作者简介：顾廷炜（1991—），男，江苏泰州人，博士，工程师，主要研究方向为智能传感器与微系统技术。

汤明宏（1990—），男，河南信阳人，硕士，工程师，主要研究方向为微系统电路设计与应用。

孙晓冬（1988—），男，江苏无锡人，硕士，高级工程师，主要研究方向为微系统电路设计与应用。

参 考 文 献

- [1] 杨晓君, 张梦琦, 任萌娜, 等. 基于微流控芯片的生物传感器发展现状与展望 [J]. 电子与封装, 2022, 22 (6): 060502.
- [2] IYENGAR K P, KARIYA A D, BOTCHU R, et al. Significant capabilities of SMART sensor technology and their applications for Industry 4.0 in trauma and orthopaedics[J]. Sensors international, 2022, 3: 100163.
- [3] HUNTER G W, STETTER J R, HESKETH P, et al. Smart sensor systems[J]. The electrochemical society interface, 2010, 19(4): 29.
- [4] SONG E Y, LEE K. Understanding IEEE 1451-Networked smart transducer interface standard-What is a smart transducer? [J]. IEEE instrumentation & measurement magazine, 2008, 11(2): 11-17.
- [5] LEAL R L, CASTILLO J M, LÓPEZ A G M, et al. Analysis of the development of smart sensors based on MEMS devices and smart sensor platform proposal[C]//2016 IEEE International Engineering Summit. Bocal del Rio, Mexico: IEEE, 2016: 1-6.
- [6] 孟峰, 张磊, 赵子未, 等. 基于物联网的智能传感器技术及其应用 [J]. 工矿自动化, 2021, 47 (z1): 48-50.
- [7] WANG B, HAN Y, TIAN D, et al. Sensor-based environmental perception technology for intelligent vehicles[J]. Journal of sensors, 2021, 2021: 1-14.
- [8] HUNTER G W, XU J C, BIAGGI-LABIOSA A M, et al. Smart sensor systems for human health breath monitoring applications[J]. Journal of breath research, 2011, 5(3): 037111.
- [9] HUNTER G W, MAKEL D B, XU J C. Smart sensor platforms and systems for aerospace applications [C]//17th International Meeting on Chemical Sensors. [S.l.]: [s.n.], 2018.
- [10] 兰之康. 智能传感器在航天运输系统中的应用 [J]. 中国集成电路, 2021, 30 (5): 15-17.
- [11] ISMAIL M N, MOHD A, SHUKRAN M, et al. Establishing a soldier Wireless Sensor Network (WSN) communication for military operation monitoring [J]. International journal of informatics and communication technology, 2018, 7(2): 89-95.
- [12] OLSSON R H, BOGOSLOVOV R B, GORDON C. Event driven persistent sensing: overcoming the energy and lifetime limitations in unattended wireless sensors [C]//2016 IEEE Sensors. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-3.
- [13] 孙慧广, 杨雨松, 郑维先. 军用传感器核心技术需求分析和发展问题研究 [J]. 自动化技术与应用, 2020, 39 (12): 142-145.
- [14] 吕佩珏, 黄哲, 王晓明, 等. 多功能传感器集成综述 [J]. 电子与封装, 2023, 23 (8): 080201.
- [15] FORTINO G, GHASEMZADEH H, GRAVINA R, et al. Advances in multi-sensor fusion for body sensor networks: Algorithms, architectures, and applications [J]. Information fusion, 2019, 45: 150-152.