

智能传感器技术综述*

赵 丹^{1,2}, 肖继学³, 刘 一¹

(1. 西南民族大学 四川 成都 610041; 2. 四川大学 四川 成都 610065;
3. 西华大学 四川 成都 610061)

摘 要: 在介绍智能传感器基本结构的基础上,分析了智能传感器的基本功能。从智能传感器功能构成的角度详尽地阐述了智能传感器的信号感知与调理技术、实现“感知”与“认知”功能的信号处理技术以及通信技术的发展现状,并从此3个方面展望了智能传感器的发展前景。

关键词: 智能传感器; 敏感元件; 信号调理; 信号处理; 通信

中图分类号: TP212.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2014)09-0004-04

Overview of smart sensor technology*

ZHAO Dan^{1,2}, XIAO Ji-xue³, LIU Yi¹

(1. Southwest University for Nationalities, Chengdu 610041, China;
2. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 3. Xihua University, Chengdu 610061, China)

Abstract: On the basis of introduction of architecture of smart sensor, basic functions of smart sensor are analyzed. From functions of smart sensor point of view, the technologies of signal sensing and conditioning of smart sensor, signal processing which performs perception and cognition functions of sensor, and development status of communication technology are depicted in detail, and smart sensor development is prospected from the three aspects.

Key words: smart sensor; sensitive component; signal conditioning; signal processing; communication

0 引 言

智能传感器已成为当今传感器技术的一个主要发展方向。高性能、高可靠性的多功能复杂自动、测控系统以及基于电子标签即射频识别(radio frequency identification, RFID)技术以“物”的识别为基础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^[1-4]。

智能传感器目前还未有统一的科学定义。IEEE 协会从最小化传感器结构的角度,将能提供受控量或待感知量大小且能典型简化其应用于网络环境的集成的传感器称为智能传感器^[5]。相对于仅提供表征待测物理量大小的模拟电压信号的传统传感器,充分利用当代集成技术、微处理器技术等的智能传感器,其本质特征在于其集感知、信息处理与通信于一体,能提供以数字量方式传播具有一定知识级别的信息,具有自诊断、自校正、自补偿等功能^[6]。

智能传感器首先借助于其传感单元,感知待测量,并将之转换成相应的电信号。该信号通过放大、滤波等调理后,

经过 A/D 转换,接着基于应用算法进行信号处理,获得待测量大小等相关信息。然后,将分析结果保存起来,通过接口将它们交给现场用户或借助于通信将之告知给系统或上位机等。由此可知,智能传感器主要完成信号感知与调理、信号处理和通信三大功能。本文将从这三方面阐述智能传感器技术的发展现状。

1 信号感知与调理技术

智能传感器一般通过信号感知模块中的敏感元件将待测量最终转换成模拟电压信号。目前能感知的量很多,有物体位移、速度、加速度等运动量,温度、湿度、压力等过程量,光强、波长、偏振度等光的特性量,流量、浓度、pH 值等液体特性量,成分、浓度等气体特性量,葡萄糖、尿素、维生素等化学成分等^[7]。智能传感器中的敏感元件有些如传统传感器一样单个存在的,有些借助于微机械技术、硅集成等技术以阵列方式存在,以提高测试精度与可靠性,有些将多种敏感元件以一定的方式复合分布在感知模块中以感知多种待测量^[8]。

收稿日期: 2014-04-15

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13NZYQN28); 教育部资助项目(Z2012015); 西南民族大学学术带头人培养基金资助项目

感知模块出来的信号一般含有来自于外界的干扰,需要“净化”处理以确保测试精度。另外,该信号一般比较小,有时甚至非常微弱,通常需要利用电桥等电路进行信号放大。这些功能一般通过具有滤波、放大等功能的,如测试放大器等调理电路予以实现。感知模块与调理电路有时分开放置,有时集成在一个模块上。

2 信号处理技术

就本质而言,智能传感器的信号处理主要完成“感知”、“认知”这2个方面的功能。“感知”就是通过对来自于调理电路信号的分析,获得待测物理量或待测参数、性能的大小,本文称之为粗信号处理。“认知”指智能传感器通过信号处理,获取关于其自身状态、测试状态等方面的知识,本文称之为细信号处理。

2.1 粗信号处理

有些待测量可根据其定义利用单个调理信号直接获得,如温度、位移、交流电流有效值等^[7-9];有些待测量则需要多种调理信号,如交流电力的视在功率、有功功率等性能指标^[10],本文称这些方法为定义法。还有些待测量只能通过与之相关的各物理量的综合分析才能便捷、可靠地测出,如混合气体的成分和各成分的浓度^[11]、人体摔倒等^[12],本文称之为综合法。研究表明,利用定义法可获得的很多待测量,借助于数字信号处理技术也可以获知,如交流电力电压/电流的有效值、交流电力的功率等^[13-15],本文称之为分析法。定义法乃智能传感器的一种基本粗信号处理方法,可根据待测量的物理概念或定义予以实现。它通常用于测试系统中,本文不做赘述。综合法、分析法则充分体现了智能传感器的特质。

基于数据融合技术,综合法主要用于传统方法获取比较困难、精度不高、测试不可靠,甚至不能测试出待测量的信号。例如:对于一氧化碳、氢气、甲烷、乙炔等有毒、有害、可燃性气体的种类与浓度,传统的色谱法测试不连续、繁琐、时间长,单一响应快的气敏元件其选择性能差。为此,人们探索出了采用气敏阵列理论的多种综合法较好地克服了这些问题^[11]。气敏阵列理论的基本思想就是利用多种能较好感知不同气体的气敏元件构成阵列,借助于模式识别理论计算出混合气体中气体的成分和各种气体的浓度。基于多变量分析模式识别原理的综合法能以大于68%的精度检测出含0%~5%乙醇的气体中混入的 $(10\sim 80)\times 10^{-6}$ 的氢气,将一氧化碳对氧化锡甲烷敏感元件、甲烷对氧化锡一氧化碳敏感元件的交叉敏感度分别降至5%、2%,以高于93.5%~89%的准确率分别测试出 CH_4 、 C_4H_{10} 、CO 3种单一气体以及 CH_4 与 C_4H_{10} 、 CH_4 与CO 2种混合气体的浓度,利用一种12单元氧化锡气敏阵列能100%识别出甲醇、乙醇、丙醇、丁醇,能以73%的精度对2种啤酒与淡啤酒、威士忌、白兰地共6种饮料进行识别。人们采用神经网络模式识别法构建的8单元阵列人工嗅觉模块能完全准确地识别出5种牌号的香水与5种风味气味(橘子、草莓、葡萄、桃子)。又如,摔倒是老年人身体健康的一个主要危害,据估计,在福利院或独自生活的年满75岁以上的老年人每年至少有30%摔倒过。单个被动式红外传感器或具有通信与运动探测功能的腕式穿戴设备或照相机均难于完成人体摔倒的自动、可靠侦测。人们利用红外集成(infrared integrated systems IRISYS)热图像传感器,综合应用运动识别、运动估计、运动跟踪、基于目标的推理、分类等技术,较好地实现了对老年人摔倒的自动、可靠侦测^[12]。

事实上,调理信号中始终存在着干扰,若采用定义法,这些干扰通常将直接影响、限制测试精度。减少干扰就成为提高测试精度的一种直接现实途径。它一般通过2种方式实现:提高调理电路的滤波性能或在粗信号处理之前采用软或(和)硬件滤波。前者增加了调理电路的复杂度,后者需要额外的滤波电路(针对硬件滤波)或消耗大量的系统CPU资源(针对软件滤波)^[16]。为此,人们基于分析法开始了这方面的研究^[13-15]。分析法的基本任务是寻求能降低调理信号中干扰对分析精度影响的待测量获取算法,其根本目的乃提高测试性能或简化智能传感器硬件结构,以降低智能传感器的成本或提高其性/价比,利于智能传感器的推广、应用。对于交流电力智能传感器,人们分别基于误差最小二乘(LMS)理论、相关性原理研究出了电压有效值与初相位的2种分析算法以及电力功率性能指标的2种分析算法。相对于定义法,前2种算法能减少至少50%的计算量,降低约2/3测试误差,允许的干扰幅值从信号幅值原来的5%放宽至15%;后2种算法能减少至少49.4%的计算量,降低约2/3的测试误差,对调理电路降低了3倍以上的信噪比要求。

2.2 细信号处理

粗信号处理的精度与稳定性常受到如偏移误差、增益误差、非线性误差以及环境等方面的影响,智能传感器需通过细信号处理来认识其“健康”状态,“弥补”其分析偏差,确保测试的可靠性、精确性。细信号处理通常包括自诊断、自校正、自补偿。

自诊断用于检测智能传感器是否“健康”:各组成部分能否正常工作,系统参数是否配置合适,整个系统能否正常进行测试、通信等。它通常利用人工智能等理论方法,例如:一种基于知识库或专家系统的智能传感器自诊断方法^[17]。自校正用于智能传感器各组成部分状态、特征参数及系统参数的校正。自补偿则用于补偿待测量的非线性或因温度、环境变化等造成的测试误差。针对智能传感器的特性易受多种因素影响的情况,一种神经网络及其收敛快、

精度高的训练方法^[18]。为减少自校正点和自校正时间,人们在充分考虑调理信号概率密度函数的基础上,利用循序多项式插值探索出了一种适合于智能传感器的自适应自校正算法^[19]。人们基于人工神经网络理论研究出了一种构建能自校正与补偿、有较好适应性与灵活性的传感器非线性融合逆模型的方法^[20]。利用该方法设计出气体敏感器件 TGS823 的逆模型,在不同的环境中能以 99.2% 的准确率分析出气体浓度。对于智能磁航向传感器,人们分别利用最佳椭圆拟合、最小二乘拟合及 BP 神经网络探索出了 3 种磁航向误差补偿算法^[21]。对于误差大于 14° 航向角,这 3 种算法的补偿精度分别为 $\pm 0.8^\circ$, $\pm 0.35^\circ$ (试验点数为 8), $\pm 0.3^\circ$ (试验点数为 72, 4 个试验点时为 $\pm 3^\circ$)。单采样周期内实时计算所需时间分别为 20, 20, 100 ms。

信号处理一般在通用微处理器上借助软件予以实现,也可利用专用集成电路或数字信号处理器予以硬件实现,或部分功能通过软件实现,部分功能通过硬件实现。

3 通信技术

IEEE 1451 系列标准乃智能传感器通用通信标准,该标准支持多种现场总线、以太网等现有的各种网络技术。IEEE 1451 第七部分则规定了智能传感器与目前正蓬勃兴起的物联网间的通信接口标准。人们在这方面开展了大量工作并取得了丰硕成果。例如:人们研究出了一种基于 IEEE 1451 标准的智能传感器结构,提出了即插即用 Web 智能传感器的一种基于 Web 服务方法,实现了一种基于 CAN 协议的温度智能传感器,探索出了一种智能传感器无线网络组织结构协议和一种基于 Zig Bee 无线通信技术的智能传感器无线接口设计方案等^[22-26]。

通信模块以软件硬件方式实现,它一般与智能传感器的信号处理模块集成在一起。

实现智能传感器目前主要有 3 种方式。一种方式是将信号感知与调理模块、信号处理模块、通信模块等通过导线等方式组合在一起即可,这种实现方式适合于智能化如化工厂等用户原有传统传感器的场合;另一种方式乃利用微机械加工、微电子加工等技术将这些模块集成在一片芯片上,实现了智能传感器的微型化。这是商品化智能传感器的最佳选择,这种智能传感器使用方便、性能稳定、可靠。还有一种方式乃将这些模块集成在两片或多片芯片上,然后由这些芯片构成智能传感器,这是目前商品化智能传感器的一种较好选择。

4 发展方向

智能传感器将向着精度与可靠性高、品种多、功能丰富、复合型、集成化与微型化等方向发展。研究新型敏感材料、探索新颖感知方法、敏感元件的阵列化与复合化将成为智能传感器感知技术未来发展的主要方向。新的敏感材

料、感知方法意味着感知范围的扩大或感知可选择性的增强。敏感元件的阵列化乃智能传感器高精度、高可靠性的必要源泉。立体分布、微加工的集成化多种敏感元件为智能传感器的多功能、复合型提供坚实的物质基础。

以定义法、基于数据融合技术与模式识别理论的综合法为代表的粗信号处理方法和利用专家系统、神经网络、自适应等理论的细信号处理方法目前主要研究的是如何精确、可靠地实现智能传感器的“感知”、“认知”这两大信号处理功能。分析法则研究了让智能传感器如何“瘦”系统、低成本地去完成其“感知”功能。分析法比较充分地体现了智能传感器中信号处理的能力,它有利于智能传感器的集成化、微型化。智能传感器的商品化需求将驱使分析法快速发展,并让其从“感知”推广至“认知”。随着计算机技术、控制技术、数字信号处理技术的发展,智能传感器的信号处理将变得日益精密、可靠、健壮。

以智能传感器为节点构成的智能传感网络是重要发展方向,在多功能、高精度的复杂分布式测控系统中将显示出其强大的生命力并起着非常重要的基础作用。智能传感器的通信技术将会随着总线技术、网络技术、通信技术的发展而不断丰富、发展。随着微机械加工技术、微电子加工技术的发展,市场将推动智能传感器向着集成化、微型化方向快速发展。

5 结论

本文首先介绍了智能传感器的基本结构,分析了其功能构成。然后根据其功能组成,从智能传感器的信号感知与调理技术、包含粗信号处理与细信号处理并实现“感知”与“认知”功能的信号处理技术、通信技术 3 个方面详细阐述了智能传感器技术的发展现状。最后从这 3 个方面展望了智能传感器技术的发展前景,指出高性能、多种类、多功能、复合型、集成化、微型化、网络化乃智能传感器未来的发展方向。

参考文献:

- [1] 宋光明,宋爱国,黄惟一,等.一种基于网络化智能传感器的分布式测控方法[J].系统仿真学报,2004,16(2):2817-2820.
- [2] 肖继学,黎亚元,陈廷成.数控系统运行状态综合测试系统的分布式开发[J].西华大学学报,2005,24(5):18-21.
- [3] 宁焕生,张瑜,刘芳丽,等.中国物联网信息服务系统研究[J].电子学报,2006,34(12):2514-2517.
- [4] 丁露梅,格.智能传感器在物联网领域中的应用[J].信息技术与标准化,2010(8):22-25.
- [5] IEEE 1451 Committee. IEEE Standard 1451.2-1997. Standard for a smart transducer interface for sensors and actuators-transducer to microprocessor communication protocols and transducer elec-

- tronic data sheet (TEDS) [S].
- [6] Zhang Yong ,Gu Yikang ,Vlatkovic Vlatko ,et al. Progress of smart sensor and smart sensor networks [C]// Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation ,2004: 3600 – 3606.
- [7] 王雪文,张忠勇. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [8] 李守智,田敬民. 智能传感器技术及相关工艺的研究进展[J]. 传感器技术, 2002, 21(4): 61 – 64.
- [9] 闫晓,钱晓龙,汪晋宽. 一种电流真有效值测量智能传感器设计[C]// 中国仪器仪表学会第五届青年学术会议, 2003: 107 – 123.
- [10] 肖继学,杨瑜,王凯,等. 基于定义的交流电力有功功率测试法[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2010, 29(2): 152 – 155.
- [11] 梅涛. 阵列式智能气体传感器综述[J]. 传感技术学报, 1992(4): 52 – 57.
- [12] Sixsmith Andrew, Johnson Neil. A smart sensor to detect the falls of the elderly [J]. IEEE Journal of Pervasive Computing, 2004, 3(2): 42 – 47.
- [13] 肖继学,李世玺,程志. 交流电压智能传感器的粗信号处理[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 35 – 38.
- [14] 肖继学,杨瑜,王凯,等. 基于相关分析的交流电力有功功率测试研究[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4): 5 – 7.
- [15] 车畅,胡丹. 交流电力功率智能传感器粗信号处理[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(4): 598 – 603.
- [16] 侯勇,苗升展,崔尚文,等. 超低功耗一氧化碳智能传感器的设计[J]. 天津科技大学学报, 2013, 28(6): 60 – 64.
- [17] 于莲芝,梁卫冲,颜国正. 现场总线基于知识的智能传感器故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 787 – 788.
- [18] 翁桂荣. 关于人工神经网络在智能传感器中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 298 – 300.
- [19] Pereira J M, Dias ,Postolache Octavian ,Silva Girão P M B. Adaptive self-calibration algorithm for smart sensors linearization [C]// Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005: 648 – 652.
- [20] 庄哲民. 基于环境参数融合的智能气体传感器设计[J]. 计量学报, 2004, 25(4): 380 – 383.
- [21] 杨新勇,黄圣国. 智能磁航向传感器的研制及误差补偿算法分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3): 244 – 248.
- [22] Sorribas J ,Río J del ,Trullols E ,et al. A smart sensor architecture for marine sensor networks [C]// Proceedings of International Conference on Networking and Services, 2006: 93.
- [23] Ciancetta Fabrizio ,D' Apice Biagio ,Gallo Daniele ,et al. Plug-n-play smart sensor based on web service [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 882 – 889.
- [24] Jadsonlee da Silva Sá ,Jaidilson Jódá Silva ,Miguel Goncalves Wanzeller ,et al. Monitoring of temperature using smart sensors based on CAN architecture [C]// Proceedings of the 15th International Conference on Electronics, Communications and Computers, 2005: 218 – 222.
- [25] 刘刚,周兴社. EEPC: 一种新的无线智能传感器网络组织结构与协议[J]. 计算机工程, 2005, 31(18): 47 – 49.
- [26] 赵曦,解永平. 基于 Zig Bee 的智能传感器网络无线接口设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1639 – 1640.

作者简介:

赵丹(1982–),女,四川攀枝花人,博士研究生,副教授,主要从事传感器、网络安全研究。

(上接第3页)

- [13] Somov S I ,Reinhardt G ,Guth U ,et al. Multi-electrode zirconia electrolyte amperometric sensors [J]. Solid State Ionics, 2000, 136 – 137: 543 – 547.
- [14] Bi Zhonghe ,Mastaumoto H ,Ishihara T. Solid-state amperometric CH₄ sensor using ,LaGaO₃-based electrolyte [J]. Solid State Ionics, 2008, 179(27 – 32): 1941 – 1644.
- [15] Shoemaker E L ,Vogt M C ,Dudek F J ,et al. Gas microsensors using cyclic voltammetry with a cermet electrochemical cell [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1997, 42(1): 1 – 9.
- [16] Hibino T ,Wang S. A novel sensor for C1-C8 hydrocarbons using two zirconia-based electrochemical cells [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1999, 61(1 – 3): 12 – 18.
- [17] Hibino T ,Kuwahara Y ,Kuroki Y ,et al. Solid electrolyte HC sensor on gasoline engines [J]. Solid State Ionics, 1997, 104(1/2): 163 – 166.
- [18] Inaba T ,Saji K ,Sakata J. Characteristics of an HC sensor using a Pr6O11 electrode [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2005, 108(1/2): 374 – 378.
- [19] Guth U ,Zosel J. Electrochemical solid electrolyte gas sensors-hydrocarbon and NOx analysis in exhaust gases [J]. Solid State Ionics, 2004, 10(5/6): 366 – 377.
- [20] Zosel J ,Muller R ,Vashook V ,et al. Response behavior of perovskites and Au/oxide composites as HC-electrodes in different combustibles [J]. Solid State Ionics, 2004, 175(1 – 4): 531 – 533.
- [21] Ueda T ,Elumalai P ,Plashnitsa V V ,et al. Mixed-potential-type zirconia-based sensor using In₂O₃ sensing-electrode for selective detection of methane at high temperature [J]. Chemistry Letters, 2008, 37(1): 120 – 121.
- [22] Flemming W J. Physical principles governing nonideal behavior of the zirconia oxygen sensor [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1977, 124(1): 21 – 28.

作者简介:

唐镜淞(1987–),男,山东莒县人,硕士研究生,主要研究方向为化学传感器的研制与应用。