

无源传感器的研究与应用进展

祝志祥¹, 陈新¹, 马光¹, 陈保安¹, 韩钰¹, 邓元², 史永明²

(1. 国网智能电网研究院 电工新材料及微电子研究所, 北京市 昌平区 102209;

2. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京市 海淀区 100191)

Research and Application Progress of Passive Sensors

ZHU Zhixiang¹, CHEN Xin¹, MA Guang¹, CHEN Baoan¹, HAN Yu¹, DENG Yuan², SHI Yongming²

(1. Department of New Electrical Materials and Microelectronics, State Grid Smart Grid Research Institute, Changping District, Beijing 102209, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Haidian District, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: Passive sensors can combine the sensing signal and power supply together to generate power by itself, which solves the power supply problem of sensor system. The mechanism, types, performance characteristics and its application in the grid for surface acoustic wave passive sensors and those based on energy materials are described, and with a comprehensive analysis and comparison of performance parameters for surface acoustic wave type, piezoelectric type, thermoelectric type and other domestic and foreign typical passive sensors, the main research direction of the high-performance passive sensors and its application prospect in the future smart grid construction are introduced.

KEY WORDS: sensor; power supply; self-powered; smart grid

摘要: 无源传感器器件将传感信号和供电电源合二为一, 实现了传感器的自主能源供给, 解决了传感器系统的供电难题。主要阐述了声表面波型和基于能源材料的无源传感器的基本原理、种类、性能特点及其在电网中应用的发展现状, 并通过对声表面波型、压电型、热电型等国内外典型无源传感器性能参数的综合分析比较, 提出我国今后高性能无源传感器的主要研究方向及其在未来智能电网建设中的应用前景。

关键词: 传感器; 电源; 自供电; 智能电网

0 引言

传感器是一种检测装置, 能感受到被测量的信息, 并将感受到的信息按一定规律变换成电信号或其他所需形式的信息后输出, 以满足信息传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。传感器是人类五官的延伸, 可称之为电五官。从茫茫太空到浩瀚海洋, 电力、航空航天、军事、建筑、轨道交通、航海、油气勘探、工业生产等各类工程系统, 都离不开各式各样的传感器。

近年来, 随着传感器在各行业领域的广泛应用, 其使用过程中暴露出的一些技术问题也越来越引起研究者的关注, 其中比较突出的是传感器的自

身供电问题^[1]。对于易燃、易爆、高电压、强电磁场等一些特殊应用场合和服役工况条件, 其现场环境无法提供安全稳定可靠的电源, 导致传感器无法正常使用。现役的常规传感器产品, 绝大多数只能在有外界供电的情况下才能完成信号采集、处理和传输的功能, 这就需要有外接电源或内置电池来为其提供电能。但这两种供电方式都有其不可避免的问题: 1) 采用外接电源线的供电方式需提前布线, 这会增加前期的施工成本, 且传感器的灵活性较差; 2) 内置电池会面临电池耗尽的问题, 更换电池不仅消耗人力、物力, 废弃的电池还会对环境造成极大的破坏。此外, 即使是使用太阳能电池供电, 也会遇到连续阴雨天气影响其正常运行的情况。因此, 传感器的供电问题已在一定程度上阻碍其应用的步伐和大规模的推广^[2]。传感器将被测信息转变成电信号, 若可以将此电信号同时也作为传感器

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGRI-WD-71-14-013)。

Scientific and Technological Project of State Grid Corporation of China (SGRI-WD-71-14-013).

的电源,将可从根本上彻底解决传感系统的供电问题,真正实现传感器的无源化运行。

1 无源传感器的类型

传感器无源化,指的是不需要任何外部电源或电池供电,依靠传感器自身获取自然或环境中的能量而使传感器正常工作。

无源传感器主要有光纤无源传感器、声表面波无源传感器和基于能源材料的无源传感器等几类。其中光纤传感器的工作原理是:光源发出的光经过光导纤维传入光传感元件;在光传感元件中经光电转换将测量检测的参数调制成幅度、相位、偏振等信息;最后利用微处理器,如频谱仪等进行信号处理。光纤传感器具有数据传输速度快和测试温度高的特点,因信息传播载体是光波而不受电磁辐射的影响^[3]。关于光纤无源传感器的研究和应用已比较成熟,目前国内外学者主要研究和关注的是声表面波无源传感器和基于能源材料的无源传感器。

1.1 声表面波无源传感器

声表面波(surface acoustic wave, SAW)是一种在固体浅表面传播的弹性波。由于声表面波的传播速度比电磁波慢 100 000 倍,且在它的传播路径上容易取样和进行处理。1965 年,美国怀特和沃尔特默首次采用叉指换能器激发 SAW,加速了声表面波技术的发展。图 1 为基于声表面波的典型无源传感器的实物照片^[4]。根据工作模式的不同,可以把现有的无源 SAW 传感器分为谐振型和延迟线型两类。其中谐振型传感器主要用于制作化学传感器,延迟线型传感器则主要用于温度、压力、应力等物理量的检测。SAW 传感器是电子技术与材料科学相结合的产物,它由 SAW 振荡器、敏感的界面膜材料和振荡电路组成。SAW 传感器的核心部件是 SAW 振荡器,由压电材料基片和沉积在基片上不同功能的叉指换能器所组成,其本质是利用叉指换能器将机械能转化为电能^[5]。SAW 传感器无需额外提供能量,系统会利用自身收集的能量进行工



图 1 基于声表面波的无源传感器实物图

Fig. 1 Passive sensor based on surface acoustic wave

作,这就大大扩展了 SAW 的应用领域。

1.2 基于能源材料的无源传感器

基于能源材料的传感器可以将自然界中的光能、热能、机械能等转化为电能,从而实现为传感器系统供电。当前,基于能源材料传感器的国内外研究热点主要集中在光电、热电、压电无源传感技术领域。

基于晶体的电光效应原理,利用电光晶体或光波导调制器制成电光式传感器,配以光纤进行信号传输的传感测量系统,可以对复杂环境中或小空间内的电磁脉冲场进行高保真的测量。与传统的电测有源探头、同轴电缆传输的传感器相比,基于电光效应原理研制的各类无源传感器具有宽频带、探头部分无源化、抗干扰能力强、对被测对象扰动极小、灵敏度高突出优点,可广泛应用于高电压、强电磁脉冲、雷电、强辐射区场强、高功率微波等电磁测量领域^[6]。

压电效应是压电传感器的主要工作原理,如图 2 所示^[7]。由于具有压电性的晶体对称性较低,当受到外力作用发生形变时,晶胞中正负离子的相对位移使正负电荷中心不再重合,导致晶体发生宏观极化,而晶体表面电荷面密度等于极化强度在表面法向上的投影,因此,压电材料受压力作用形变时两端面会出现异号电荷而产生电压,从而将机械能转化为电能,实现对压力、加速度等的测量传感。

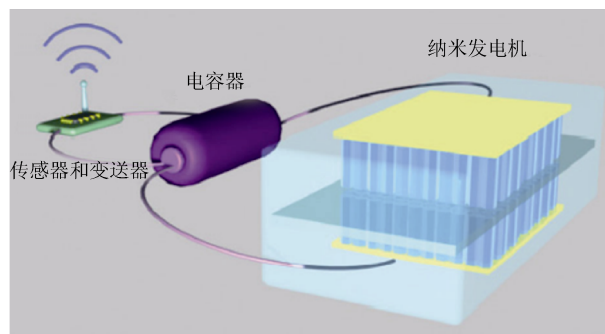


图 2 基于压电材料的无源传感器原理示意图

Fig. 2 Working principle of passive sensor based on piezoelectric materials

热电型传感器是基于热电材料的热电效应,利用器件内部载流子运动实现热能和电能直接相互转换。当器件两端存在温差时,热场驱动器件内的载流子定向运动,从而产生温差电流。由于温差电流与热场存在一定的相关性,因此温差电流不仅可用于热电型传感器系统的供电,同时还是灵敏有效的传感信号。图 3 给出了热电型无源温度传感器的

基本工作原理图,可以看出:外界温度变化触发内部热电器件,由热电器件为各个模块供电。内置的数字型温度传感器测量外界温度值,并将温度信号传给信号处理模块,再将温度数据发送。

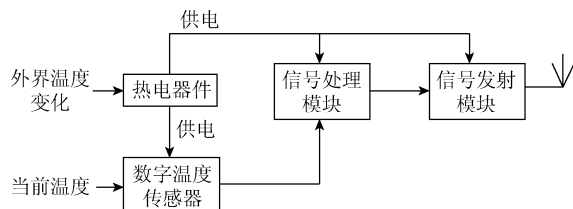


图3 基于热电材料的无源传感器工作原理图

Fig. 3 Working principle of the passive sensor based on thermoelectric materials

2 无源传感器在电网中的应用

2.1 声表面波器件的应用

声表面波技术自 60 年代末发展至今,目前应用已涉及到许多学科领域,如设备系统监测、地震学、雷达通信、航空航天及石油勘探等,特别是近年来智能电网建设的日益推进,声表面波传感器等无源传感器在智能变电站等电气设备状态监测预警中的应用越来越受到重视。

变电站中电力设备的热效应是多种故障和异常现象的重要诱因,变电站中断路器、管型母线、互感器、隔离开关动静触头、电缆接头、母线接头等电气连接点等需温度监控的点非常多,且分布在开关柜内、高空裸露等各个位置,给温度监测造成极大不便。基于 SAW 的温度传感系统采用射频识别(radio frequency identification, RFID)与 SAW 芯片混合集成且支持多点探测,为变电站中电力设备及关键部件状态的实时监控提供了一种有效的解决方案^[8-9]。

文献[4]将声表面波器件组网用于监测多个电力开关柜内的温度,该传感器网络包含 6 个声表面波温度传感器、2 套双工天线,每套天线负责 3 个传感器。通过为传感器设定不同的工作频率来实现多址,并避免同频干扰,探测范围为 2.5 m,测温范围为 $-20\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,无线通信频率为 $433\pm 5\text{ MHz}$ 。文献[10]将声表面传感器安装在开关柜中,用于温度监测,监测装置如图 4 所示。装置中的声表面传感器发射端产生的声表面波频率会随温度变化,系统接收端包含高分辨率接收器、可编程增益放大器、高精度检波器和 8 阶带通滤波器。系统无线信号采用 433 MHz 频段,无线信

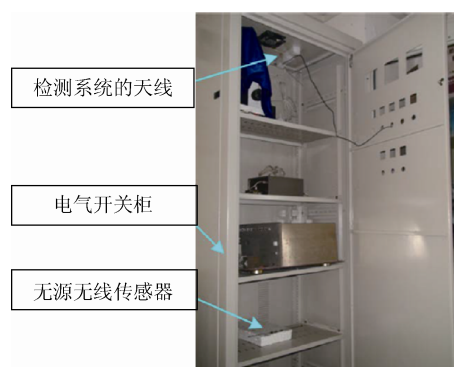


图4 基于声表面波的开关柜温度监测装置

Fig. 4 Temperature monitoring device of switch cabinet based on surface acoustic wave

号传输距离可达 20 m,测量灵敏度可达 $1.1\text{ kHz}/^{\circ}\text{C}$,最小温度分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 基于能源材料传感器的应用

近年来,研究者提出了基于压电材料的微型纳米发电机的概念。文献[7,11]基于 ZnO 纳米线阵列研制出可产生 20 V、 $6\text{ }\mu\text{A}$ 的纳米发电器件,器件的功率密度为 $0.2\text{ W}/\text{cm}^3$,器件被连接到压电能量收集电源 LTC3588-1 上,在 20 min 内经过 1 000 次拉伸循环后,其产生的能量可驱动一个电子表工作 1 min;此外,该纳米器件可用于驱动 5 mW 射频无线模块,从而实现信号的无线发送。

在前期研究基础上,项目组提出基于热电效应的无源温度传感器概念,并研制出相应的无源传感器系统^[12-13],图 5 为其实物图。利用低温区热电材料碲化铋(Bi_2Te_3)对温度的敏感性及其发电特性,实现了将温度传感信号和供电电源的合二为一。系统利用自身被触发时产生的电信号作为电源,为后端的数据处理电路和无线通信电路提供电能,实现了传感信号从采集、处理到无线发送的完全自供电运行。在 $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,该无源温度传感器具有较高的精度和技术经济性,将是未来较好的选择。在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温差环境下,该传感器可产生 3 V、100 mA 的电能,多个传感器可组成传感网,无线通信频段为 2.4 GHz,最大信号收发距离为 100 m,测温精度达到 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果工作温度比较高,可以利用中温区(Pb-Te 系列)或高温区(Si-Ge 系列)热电材料来制作。此外,在一些不适合引入电池或电源的场所,如油库、易燃品仓库等特殊场所,无源热电温度传感器将具有更加独特的优势。

2.3 无源传感器的技术发展

无源传感器可以有效解决因使用电池及电源



图5 基于热电材料的无源温度传感器

Fig. 5 Passive temperature sensor based on thermoelectric materials

带来的各种问题，但也面临着一些急需改进优化的技术问题。表1比较了目前国内外几种典型的无源传感器的性能参数，可以看出：基于声表面波的无源传感器探测范围广、灵敏度高，但其无线信号传输距离有限，一般仅为20 m以内；压电材料能够产生较大的输出电压，但由于材料内阻较大，因此输出电流极小，仅能驱动一些微功率的传感器模块；基于热电材料的无源传感器的输出功率可以满足绝大部分传感器系统的供电需求，且由于使用了射频芯片，无线信号最大传输距离在100 m左右，但由于热电材料对温差要求严格，一般只适用于有热源存在的场合。

表1 无源传感器的性能参数比较

Tab. 1 Comparison of performance parameters of passive sensors

传感器类型	输出功率/mW	无线通信距离/m	应用场合
声表面波型	—	<20	范围广
压电型	5	<50	压力场
热电型	300	100	热力场

关于未来无源传感器的研究，应加强对多功能、长寿命、灵敏度高、监控距离远无源传感器的核心元件设计、加工制作及其组网技术的研究，突破无源传感器件用新型高性能智能传感材料的开发及其应用关键技术，实现多功能集成、高精度、高灵敏度、长寿命无源传感器的自主研发与国产化应用推广。

3 结论与展望

无源传感器可以将外界其他形式的能量转换

为电能，各种类型的无源传感器需根据具体服役环境及性能要求来选择和应用。无源传感器的研究与应用解决了传感器系统的供电难题，这对降低传感器前期布线安装成本，减少废弃电池对环境的污染，具有十分重要的意义。

随着我国智能电网建设的快速发展，多功能无源传感器的自主研发及其组网应用技术将受到电力部门的更多关注。作为未来传感器的主流，无源传感器将在智能电网的全过程状态监控预警、专家智能诊断及反馈调节等方面发挥重要作用。在发电环节，可实现对发电设备状态的在线监测，提高运行机组的安全稳定性；在输变电环节，对输电线路和变电设备进行在线监测与自动诊断，可保证输电线路和变电设备的安全运行，提升输电效率和输电的可靠性；在配电环节，对配电网状态进行在线监测、预警，实现配电线路故障的快速定位，保障配电网安全、稳定运行；在用电环节，实时监测用电情况，优化负荷预测和电网负荷的调度，指导用户合理节约用电并监控防范窃电行为。

参考文献

- [1] Glynn-Jones P, White N M. Self-powered systems: a review of energy sources[J]. Sensor Review, 2001, 21(2): 91-98.
- [2] Bogue R. Energy harvesting and wireless sensors: a review of recent developments[J]. Sensor Review, 2009, 29(3): 194-199.
- [3] 万家佑, 朱卫霞. 无源传感器用于管道内原油动态参数的测定[J]. 油气田地面工程, 2014, 33(4): 56-57.
Wan Jiayou, Zhu Weixia. Determination of dynamic parameters of crude oil pipeline by passive sensors[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2014, 33(4): 56-57 (in Chinese).
- [4] Timo S, Jarmo V. Interrogation techniques for sensors utilizing inductively coupled resonance circuits[J]. Procedia Engineering, 2010(5): 216-219.
- [5] Buff W, Klett S, Rusko M, et al. Passive remote sensing for temperature and pressure using SAW resonator devices[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(5): 1388-1392.
- [6] 谢彦召, 郑振兴, 焦杰. 无源光电式传感器及其进展[J]. 传感器技术, 1999, 18(3): 5-7.
Xie Yanzhao, Zheng Zhenxing, Jiao Jie. Review of passive electro optic sensor[J]. Journal of Transducer Technology, 1999, 18(3): 5-7 (in Chinese).
- [7] Hu Y, Zhang Y, Xu C, et al. Self-powered system with wireless data transmission[J]. Nano Letters, 2011, 11(6): 2572-2577.
- [8] 张朋, 常静, 范福玲. 基于无源无线声表面波 RFID 技术的变电站

- 巡检系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(9): 2557-2560.
- Zhang Peng, Chang Jing, Fan Fuling. Research on the substation inspection system based on wireless passive SAW RFID technology[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(9): 2557-2560 (in Chinese).
- [9] 韩鹏. 声表面波远程温度传感系统在变电站中的应用[J]. 山东电力技术, 2012(6): 44-46.
- Han Peng. The application discussion on long-distance temperature sensor-based system of SAW in substations[J]. Shandong Dianli Jishu, 2012(6): 44-46(in Chinese).
- [10] Wang Y, Jia Y, Chen Q, et al. A passless wireless temperature sensor for harsh environment applications[J]. Sensors, 2008, 8(12): 7982-7995.
- [11] Hu Y, Lin L, Zhang Y, et al. Replacing a battery by a nanogenerator with 20 V output [J]. Advanced Materials, 2012, 24(1): 110-114.
- [12] Shi Y, Wang Y, Deng Y, et al. A novel self-powered wireless temperature sensor based on thermoelectric generators[J]. Energy Conversion and Management, 2014(80): 110-116.
- [13] 邓元, 史永明, 祝薇, 等. 无源温度传感器及基于无源温度传感器的测试系统: 中国, CN102494795A[P]. 2012-06-13.
-
- 收稿日期: 2014-11-14.
- 作者简介:
- 祝志祥(1981), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能传感材料及应用技术, zhuzhixiang@sgri.sgcc.com.cn;
- 陈新(1973), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电工新材料及应用技术, chenxin1@sgri.sgcc.com.cn;
- 马光(1979), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电工磁性及传感材料, maguang@sgri.sgcc.com.cn;
- 陈保安(1981), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电工新材料开发, chenbaoan@sgri.sgcc.com.cn;
- 韩钰(1976), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电工新材料开发及应用技术, hanyu@sgri.sgcc.com.cn;
- 邓元(1972), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型能源、传感材料及器件设计与加工, dengyuan@buaa.edu.cn;
- 史永明(1987), 男, 博士, 研究方向为新型智能传感材料及器件设计加工, yongming_shi@163.com.
- (责任编辑 谷子)