

物联网对传感器技术的新要求

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】随着传统产业应用信息技术范围的不断扩大，以及物联网、无线传感器网络的兴起，传感器产业已成为高新技术发展中的一个重要领域。本文就传统传感器如何适应物联网、无线传感器网络的发展，提出了对传感器技术的新要求是便携、节能、环保。技术发展方向是一部分产品应由传统型向全新型转型发展，并研发新结构、新敏感机理的传感器。新型传感器在结构与功能上应具有微型化、无线化、智能化、低驱动、低成本和快速响应等特点，同时做到稳定性好、可靠性高、寿命长、免维修。最后简要介绍了无线传感器结构原理和制造工艺特点。

【关键词】物联网；无线传感器网络；无线传感器；微型化；智能化；低驱动

一、概述

计算机、互联网、传感器被称为信息技术的三大产业。随着互联网技术的快速发展，物联网与无线传感器网络将成为继计算机、通信网络之后信息产业的第三次浪潮。国内有关调查研究机构预测，到 2020 年，物物互联业务与现有人人互联业务之比将达到 30：1，物物互联将成为下一个新兴的信息产业。而传感器是物联网整个链条需求总量最大和最基础的环节，物联网产业已进入市场导入期，传感器行业将迎来黄金发展期。中国电子信息产业发展研究院预测，未来五年国内传感器市场年复合增长 31%，预计年市场规模将达到 1200 亿元以上。物联网的本质概括起来主要体现在三个方面：一是互联网特征，即对需要联网的物实现互联互通；二是识别与通信特征，即纳入联网的物应具备自动识别与物物通信的功能；三是智能化特征，即网络系统应具有自动化、自我反馈与智能控制的特点。传感器属于物联网的神经末梢，成为人类全面感知自然的最核心元件，各类传感器的大规模部署和应用是构成物联网不可或缺的基本条件。因此，物联网发展的根基是传感器，也就是说，发展物联网，首先应发展各种各样的传感器。可以说物联网与传感器是相辅相成的促进与带动关系，在物联网与无线传感器网络技术的强力牵引下，我国传感器企业的一部分产品正由传统型向全新型转型发展

展，并研发应用新敏感机理的传感器。而传感器的转型发展和新结构、新敏感机理传感器的研发与制造工艺水平的提高，使得传感器探测精度高、制作成本低、芯片体积小，又大大促进了物联网与无线传感器网络技术的发展。我国一些企业正积极致力于推动物联网由“概念”向“产业”转化，并在多地区建立物联网基地。目前物联网应用的重点领域主要是智能电网、智能交通、智能物流、环境与安全检测、工业与自动化控制、医疗健康、国防军事等领域。例如智能交通系统，就是以现代信息技术为核心，利用先进的通讯、计算机、自动控制、力与称重传感器技术，实现对交通的实时控制与指挥管理。交通信息采集被认为是智能交通系统的关键子系统，是发展智能交通系统的基础，已成为交通智能化的前提。无论是交通控制还是交通违章管理系统，都涉及交通动态信息的采集。利用网络技术、视频技术以及埋在路面下的地感线圈、压电薄膜轴传感器、弯曲板式或剪切板式动态轴重秤组成的检测系统，就能实现交通信息的短期或长期采集，将车流量、车速度、车轴数、车轴距、车轴重、轴组重、整车重、车辆分类等信息进行收集分析，为公路规划、设计、维护和决策提供可靠、全面的数据，因此交通动态信息采集也就成为交通智能化的首要任务。实际上应变式力与称重传感器的传统型和改进型已经在智能交通、智能物流、环境与安全检测和工业与自动化控制领域得到了一定程度的应用。例如智能交通系统应用的固定式、便携式动态公路车辆轴重秤；用于公路车辆高速行驶超载预判的压电石英式动态轴重秤；用于公路车辆流量、车轴数、轴距、轮距、车速、轮胎数量测量及车型判断、车辆分类的压电薄膜轴传感器；智能物流、环境与安全检测系统中应用的各种具有感知、通信与计算功能的智能微型力与称重传感器等。

由大量的部署在监测区域内的微型传感器节点构成的无线传感器网络，通过无线通信方式智能组网，形成一个自组织网络系统，具有信号采集、实时监测、信息传输、协同处理、信息服务等功能，能感知、采集和处理网络所覆盖区域中感知对象的各种信息，并将处理后的信息传递给用户。这就对传感器企业提出了一个变革性的要求，即传感器必须有线变无线，在物联网和无线传感器网络需要的力、称重、力矩、扭矩、位移、压力、温度、加速度等传感器内增加电源模块、采集处理模块、无线收发模块等器件，并需要解决一系列技术与工艺问题，这即是挑战又是无限商机。无线传感器网络系统是一个学科交叉综合的、知识高度集

成的前沿热点研究领域，正受到各方面的高度关注。我国《国家中长期科学与技术发展规划(2006~2020年)》中把智能感知技术、自组织网络与通信技术、宽带无线移动通信等技术列为重点发展的前沿技术。这就对用于物联网与无线传感器网络的无线传感器开发与应用提供了技术基础。

二、物联网对传感器技术的新要求

物联网和无线传感器网络技术的迅速发展，对处于信息感知层的各类传感器提出了许多新要求，概括起来就是便携、节能、环保，同时具有微型化、智能化、非接触测量和低外形、低功耗、低成本等特点，这将是传感器的一个新的研发方向。它不仅促进传统传感器产业的加速改造，而且可导致建立新型多元化的传感器企业模式，将是一个新的经济增长点。为适应物联网和无线传感器网络技术要求，传感器技术的发展方向是一部分产品应由传统型向全新型转型发展，同时研发新结构、新敏感机理的传感器。

1. 加速传感器由传统型向全新型转型发展

为满足物联网产业的需求，相关的传感器必须加速由传统型向全新型转型发展，其结构与功能应具备微型化（即体积小、高度低、重量轻）、智能化、低驱动（或无源化）、低成本和快速响应等特点，同时做到稳定性好、可靠性高、寿命长、免维修。哪些产品适合转型发展，如何实现结构、技术、功能转型是至关重要的。转型发展就是在核心技术与工艺的牵引下，继承传统、集成创新，通过高可靠、低成本的产品来满足物联网和无线传感器网络的需求。从本质上来讲，它是基于市场理念的一场体制和机制改革，也是参与市场竞争的必然选择。以各种应变式传感器为例，为满足微型化、智能化、低功耗、低成本的需要，美国VISHAY公司研究轧制出0.00006~0.00008英寸（1.5~2 μ m）厚的康铜和卡玛应变电阻合金箔材，并利用此箔材设计制造出微型高阻电阻应变计。同时研制出采用真空沉积和溅射工艺，把金属或半导体材料直接沉积在基片上，制造出新型金属薄膜应变计和半导体薄膜应变计。微型高阻电阻应变计、金属薄膜应变计和半导体薄膜应变计均可用于制造应变式微型力、称重、力矩、扭矩、压力、位移、加速度传感器。这些传感器的弹性元件可以是可活动的膜片、悬臂梁、桥以及凹槽、孔隙、锥体等。其中金属或半导体薄膜应变计由于不用应变胶粘剂粘贴，因而弹性元件无滞后和蠕变误差，是比较理想的无线微型智能物联网传感器用敏

感元件。微型高阻电阻应变计的技术特点是：

高输出——应用比较短的敏感栅使测量装置产生较高的输出和较高的电阻，相当于应用了长的敏感栅；

高阻值——电阻值可高达 $10\sim 20\text{K}\Omega$ ；

低电流——电桥电流低，这对于压力变送器和带有电池组的传感器来说是至关重要的；

小尺寸——敏感栅尺寸小，可以做到 $1\times 1\text{mm}$ 、 $0.5\times 0.5\text{mm}$ ，特别适合微型力、称重、位移、加速度传感器；

低成本——微型金属箔电阻应变计不论是单轴型、半桥型、全桥型，敏感栅的面积都很小，降低了部件成本，连线和焊接相当于单个敏感栅应变计；

自补偿——采用卡玛合金制造敏感栅，电阻应变计具有温度和灵敏度双重自补偿功能。

应用微型高阻电阻应变计制造的各种传感器与采用普通电阻应变计制造的传感器相比，具有以下突出的特点：由于采用了微型尺寸的敏感栅，栅的长度小且位于应变峰值位置，所以实测应变值高；敏感栅的宽度与高度比较大，散热性能好应变稳定性高；高电阻值可以施加较高的激励电压，电桥输出信号大；应变计电阻值高，消耗功率低；输入阻抗高。应用金属薄膜应变计制造传感器时，由于金属薄膜应变计与体型电阻应变计的导电机理不同，其应变灵敏系数随膜的厚度而变化。厚度为数埃 (\AA) 的金属薄膜应变计的灵敏系数是普通体型电阻应变计的几十倍；厚度为 1000\AA 以上的金属薄膜应变计，其灵敏系数与普通体型电阻应变计相似。灵敏系数高的金属薄膜应变计与普通体型电阻应变计相比，在传感器弹性元件变形相同的条件下，电桥输出也高出几十倍，特别适合制造各种无线微型智能应变式传感器。

2. 研发新结构、新敏感机理的传感器

传感器的工作机理是基于各种物理效应和定律，由此可以启发人们进一步探索具有新效应的敏感功能材料，并以此研制具有新敏感机理的传感器。进入 21 世纪以来，工业发达国家传感器领域的研发重点是：以研究新型传感器和传感系统为核心，包括应用新的传感原理、使用新的材料以及采用新的结构设计等，以

降低能耗、提高敏感性、选择性、响应速度、动态范围、准确度、稳定性以及在恶劣环境条件下工作的能力。这也是发展高性能、多功能、低成本和微型物联网传感器的重要途径。相对于金属材料而言，纳米材料、半导体材料、陶瓷材料、碳纤维材料和有机材料等，只要具备灵敏度高、响应速度快、检测精度高、检测范围宽、可靠性高和工艺性好，都可以成为敏感材料。由于微结构传感器的敏感元件尺寸一般为毫米级，可以是可活动的膜片、悬臂梁、桥以及凹槽、孔隙、锥体等。这些微结构与特殊用途的上述敏感材料制造的敏感元件和高性能的集成电路相结合，已成功地用于制造各种微型传感器。由此不难得出，新型传感器产业集先进的微电子技术、计算机技术、信息技术以及先进制造技术为一体，代表了当前传感器技术和产业的发展方向，具有广阔的市场前景。近年来研发的力、称重、扭矩、位移、角度等新型传感器主要有：

(1) 用纳米材料制造的力与称重传感器

微纳米传感器是新型传感器产业代表，就微纳米传感器而言，美国、欧盟、日本等国已经形成了稳定的研发团队、设计团队、产品加工企业和用户群体，他们的微机电系统基础工艺已发展到成熟稳定的阶段。

纳米，即 10^{-9} m，相当 10 个氢原子紧密排在一起。纳米技术是在纳米空间（0.1~100nm）内研究电子、原子、分子运动规律及特性，以制造具有特定功能的材料和器件。纳米材料是纳米级的超细微粒经压制烧结而成，其特点是材质完全纯净，结构没有缺陷，具有抗紫外线、红外线，电磁干扰等特殊功能。美国传感器企业利用纳米材料在外载荷作用下，其体积变化与载荷成正比这一特性，研制出纳米微型力与称重传感器。

(2) 用碳纤维材料制造的力与称重传感器

日本学者柳田博明研制的碳纤维复合功能材料，以乙烯树脂为基体，含 0.3%~0.6%的碳纤维和 31.6%的玻璃纤维。此种碳纤维复合材料，具有在外载荷作用下电阻值增大的特性，在一定的变形范围内，其电阻变化与应变呈较严格的线性关系，利用这一特性即可研制出体积小、高度低、重量轻的碳纤维力与称重传感器。制成像弹簧一样的螺旋状微细碳线圈元件，能感受微小压力的变化，同时还可以感知“拧”、“摩擦”等动作。

(3) Z 元件力与称重传感器

Z 元件半导体传感技术是俄罗斯传感器专家 Zotove (佐托夫) 教授的研究成果。Z 元件是用电阻率 $40\ \Omega\ \text{cm}\sim 60\ \Omega\ \text{cm}$ ，厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的 N 型硅单晶，采用平面扩散工艺进行 Al 扩散以形成 PN 结，然后用 $\text{AuCl}_3\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 溶液在高温下进行 Au 扩散。制成的硅片经单面打磨后、用化学方法镀上 Ni 电极以形成欧姆接触，然后划片、切割、焊接引线 and 封装制成。过去只有温敏、光敏和磁敏 Z 元件，目前力敏 Z 元件已有应用。其应用特点是：体积极小；反应灵敏；工作电压低，工作电流小，测量电路简单；输出频率信号，可直接与计算机连接，是研制新一代数字力与称重传感器的理想元件。

(4) 光纤位移和压力传感器

反射式光纤位移传感器由光源经过发射光纤束传输入射到被测量目标表面，目标表面的反射光由与发射光纤束扎在一起的接收光纤束传输至光敏元件。根据被测量目标表面光反射至接收光纤束的光强度的变化来测量被测表面距离的变化。光纤压力传感器是在光纤位移传感器探头的前面增加一个圆型膜片构成的，其结构类似普通应变式压力传感器。光源发出的光经过发射光纤束传输并投射到膜片的内表面上，反射光由接收光纤接收并传回光敏元件。膜片位移的微小变化是在压力作用下由膜片产生的挠曲变形而引起的，测量出此变形即可求得压力变化，因为光通量是膜片的形状尺寸以及探头到膜片的平均距离的函数。

(5) 高精度非接触式扭矩传感器

美国富勒顿公司研制出一种精度达百万分之一级的非接触式 SAW 扭矩传感器，尺寸为 $4\text{mm}\times 2\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ ，该传感器不仅十分精确，而且转轴与外壳间无直接接触。可用于测量转轴的扭矩，两个 SAW 传感器与轴呈 45° 角固定，连接成“半桥”结构；当轴受到扭矩时，一个受压一个受拉，综合两个传感器的频率可产生“差分”和“叠加”信号以得出扭矩信号。

(6) 汽车胎压监测传感器

在汽车胎压监测系统中，安装在每个车轮内部的汽车胎压监测传感器至关重要，它由压力传感器、温度传感器、加速度传感器、RF 射频芯片、电池电压监测器、低功耗控制器等组成。具有下电、运行、空闲、关断 4 种工作模式，它能够准确测量轮胎内部的压力和温度，传感器通过无线形式按照一定的规律向车身

控制器实时发送轮胎的压力和温度数据，驾驶员可通过仪表盘显示屏获得每一个轮胎的压力值、温度值。当某一个轮胎的压力值或温度值变化超过了报警值，仪表盘能够准确显示报警轮胎的位置，并发出图形、声音、文字报警。由于该产品是汽车产品安全件，所以应在各种环境下具有高可靠性，一般要求压力测量范围0~3.5 Bar；温度测量范围-40~+125℃；向心加速度测量范围-12g~+115g；工作电压范围1.8~3.6 V。其中压力、温度传感器以半导体硅材料为弹性元件芯片，整合了硅显微机械加工工艺，在一块芯片上同时集成了压力和温度两个传感器，此两种传感器同时具有温度和压力补偿功能。其特点是小型、轻量、灵敏度高、响应速度快、长期稳定性好。

国内力敏、压敏、温敏材料和制造工艺的新成果主要有：

(1) 清华大学研制成功一种基于石英谐振器应变敏感效应的数字式力与称重传感器。研究了敏感元件的力敏特性、谐振器的能陷效应与谐振频率、谐波次数和结构的关系，保证了良好的频率稳定性。

(2) 沈阳仪器仪表工艺研究所在国内首次解决了扩散硅力敏芯片温度灵敏度自补偿工艺，实现了扩散硅力敏芯片的灵敏度温度自补偿。

(3) 哈尔滨理工大学研制成功了"新型本征半导体高分子压力温度双参数传感器"，首次合成聚省醌自由基高聚物，这是一种压敏系数和温度系数极高的高分子材料，通过材料表面处理等技术制成传感器，解决了油井高温潜油泵的温度和压力测量的难题。

(4) 复旦大学发明的掩膜无掩膜腐蚀新工艺为世界首创。在理论上推导出新的底面条件和新生底面深度和位置计算公式，开创了用腐蚀技术制造微结构的新工艺。

三、传感器在无线传感器网络中的应用

无线传感器网络是由在空间上相互离散的众多传感器相互协作组成的传感器网络系统。通常被用来监测在不同地点的物理、力学或环境参量，例如温度、湿度、压力、力、扭矩、应力、应变、位移等。在无线传感器网络中的每一个节点都配有无线发射和接收装置，能够和网络中的其他节点进行通讯。此外，每一个节点都有自己的微控制器，能量源（通常是电池）。单个的传感器节点的形状有很多种，根据被测量对象和用户要求而定，例如传感器的尺寸和计量性能、存

存储空间、计算性能、网络速度以及带宽等。无线传感器网络通常会组成一个无线自组织网络，每一个节点都能作为网络内其他节点的数据中继站，将传感器数据传输到基站。无线传感器网络已应用到输油管道远程监测；山体滑坡、高层建筑地基监测；桥梁强度结构健康监测等项目，它不同于一般信号处理，也不同于单个或多个传感器的监测和测量，而是对基于多个传感器测量结果基础上的更高层次的综合决策过程。有鉴于近年来传感器无线化、微型化、智能化程度的提高，以及研发出应用压电石英、光导纤维等敏感机理的新型力、称重、位移、压力等传感器，有条件实现在信息获取基础上，多种功能的传感器进一步集成以致于融合。有力的促进了传感器技术发展，在无线传感器网络系统中取得较好的应用效果。主要应用成果有：

1. 高层建筑结构强度健康监测

高层建筑结构及其敏感，其结构强度健康监测的前端测量点的部署很难采用有线方式，否则极易损害建筑结构的受力状态。因此要求测量节点具有无线能力，体积小，可以很容易的安装在建筑物的关键受力点上，而不影响建筑物外观。各节点的无线传感器应具有低功耗能力，节点一经部署不需要频繁更换，省去了复杂耗时的布线操作，只要打开节点开关，位于建筑物监控中心的接受终端就可以实时获取数据，与建筑报警系统联动后，一旦探测到可能威胁到建筑物的震动信息，立即发出报警。平时该系统收集的数据还可以用来监测建筑物老化状况，为建筑物维护提供辅助决策信息。微型无线力与称重传感器、微型无线角度传感器和微型加速度传感器等，就是高层建筑结构强度健康监测的无线传感器网络系统的理想节点部件。

2. 桥梁结构强度健康监测

利用传统的力与称重传感器和测量监控设备对桥梁结构强度健康进行监测，需要在整个桥面上铺设信号和供电电缆，不仅浪费资源而且铺设起来工程复杂庞大。而使用无线传感器网络来进行桥梁结构强度健康监测，就显得简单方便多了，只需要将无线传感器节点沿桥布置并固定在桥梁的关键受力点处，各个节点就会自动组织形成网络并且回传相关的测量数据。桥梁结构强度健康监测多采用动力响应监测的应变模态法，由于应变是位移的一阶导数，对应于每一阶位移模态，

则必有与其对应的固有应变分布状态。当桥梁发生病害时,其动力响应值会增大,因此,在桥梁的关键部位(如桥墩底部)布置一些诸如加速度传感器和应变式力传感器,测量桥梁的动力响应,通过信号调理后记录分析,判断响应值是否超过允许值或超过多少,由此对桥梁的安全性进行评判。也可以采用在桥梁各个节点上安装传感器,可长期在线监测并通过网络实现远距离操作的动力系数法,此法是指桥梁由于振动而增加的应力或动挠度对于静载所增值的比率。当桥梁发生病害时,动力系数必然会增大。其监测方法是采用电阻应变计或红外线挠度仪测量桥梁的动、静应力和动、静挠度信号,然后利用信号采集系统采集信号,采用专用软件检测和记录车辆行驶引起的时程应力和时程挠度并计算动力系数,分析动力系数是否超过允许值,从而对桥梁的局部或整座桥梁的安全状态作出评估。

3. 原油输油管线温度和压力监测

随着世界能源消耗量的增加,各个国家越来越依赖于从别国进口石油和天然气等基础能源原料,石油输油管线就是其中最为重要的一环。原油的属性决定了它必须达到一定温度才能被稀释具有良好的粘度特性和流动性。同时,本着节约能源的目的,又要把加热的温度控制在一个合理的范围内,因此,就需要对石油输油管道的温度进行监测。在确保原油能够达到良好流动性的同时降低加热的能耗。在原油管道沿线布设无线温度传感器网络是最为经济合理的方案,这样可以大大节省铺设信号和供电电缆的成本,同时又能实现数据的网络智能传输。在原油输油管线的各节点上,安装无线压力传感器又能够监测输油管线是否发生泄漏和偷盗事故,并及时报告事故位置。

四、无线力与称重传感器

无线力与称重传感器的结构与传统型基本相同,只是要求结构紧凑、体积小、高度低、重量轻。在传统制造工艺的基础上增加了电源模块、采集处理模块、无线收发模块等器件。模块封装在一个密封的、具备优良屏蔽功能的外壳内,构成全密封的无线力与称重传感器。在工作时无线力与称重传感器由电池(或太阳能)提供电源,构成无线传感器网络节点。由随机分布的集成有力与称重传感器数据处理单元和通信模块的微型节点,通过自组织的方式构成网络。它可以采集设备的受力或质量数字信号,通过无线力与称重传感器网络传输到监控中心的无线网

络上,直接送入计算机进行分析处理,根据需要无线力与称重传感器可以实时传输采集整个时间历程信号。监控中心也可以通过网络把控制、参数设置等信息无线传输给节点。数据调理采集处理模块把力与称重传感器输出的微弱信号,经过放大、滤波等调理电路后,送到模数转换器,转变为数字信号,送到主处理器进行数字信号处理,计算出力与称重传感器的有效力值或质量值。电源模块、采集处理模块、无线收发模块均采用超低功耗设计,整个力与称重传感器节点具有非常低的电流消耗,使用两节普通干电池可以工作数年之久,使维护周期大大延长,无线力与称重传感器在不采集信息的时候关断电源或置于睡眠模式。

五、结束语

作为物联网前端的感知部件,传感器在物联网的发展过程中扮演着举足轻重的角色,无线传感器网络是由在空间上相互离散的众多传感器相互协作组成的传感器网络系统,两者的核心感知部件都是传感器,可见传感器在物联网和无线传感器网络技术发展中的地位与作用。面对激烈的市场竞争以及物联网和无线传感器网络等新兴市场的崛起,国内传感器企业应该把握机遇,以全球竞争的眼光来规划品牌战略。物联网和无线传感器网络对传感器行业的挑战在于对传感器的多品种需求,多种敏感机理新产品的需求。国内生产企业应抓住传感器由传统型向全新型转型发展的大好时机,开发出满足物联网与无线传感器网络检测、处理、传输系统技术要求,具有低功耗特性,支持低碳环保应用需求的各种无线传感器。

参考文献

- 【1】刘化君. 物联网技术 [M]. 电子工业出版社. 2010年9月。
- 【2】孙利民, 李建中, 陈渝等. 无线传感网络[M]. 清华大学出版社. 2005年5月(第一版)。
- 【3】VISHAY PRECISION GROUP (美国威谢精密集团). New Strain Gages from Micro-Measurements (微测量事业部的新型电阻应变计). 第十届上海中国国际衡器展览会资料. 2011年4月。
- 【4】郝超, 强士中, 王朝晖. 大型结构的安全监测系统 [M]. 国外桥梁, 2000年第2期。