

传感器是“工业 4.0”和“中国制造 2025”的核心技术

中国运载火箭技术研究院第 702 研究所 刘九卿

【摘要】本文从“工业 4.0”“中国制造 2025”新工业革命是以制造业智能化、网络化、柔性化、绿色化、服务化为核心，将使要素配置方式、生产方式、组织模式等发生革命性转变这一特征出发，阐述了传感器是“工业 4.0”、“中国制造 2025”的核心技术及其对传感器的新要求；分析了为适应新要求传感器应从传统型向全新型转型发展，并开发新结构、新敏感机理的新型传感器；简要的介绍了无线传感器、无线传感器网络及其应用实例。

【关键词】传感器；“工业 4.0”；“中国制造 2025”；新工业革命；信息物理互联系统；智能制造

一、概述

“工业 1.0”和“工业 2.0”前两次工业革命造就了机械和电气技术，分别创造了机械化工厂和人工流水线生产系统，均对传感技术和传感器没有需求。20 世纪 70 年代开始的第三次工业革命即“工业 3.0”造就了信息技术，将计算机、可编程控制技术等应用于工厂产品的批量生产，出现了自动化流水线生产系统。对于机械类工作，计算机越来越多的代替人类，是生产力上的又一重大转折点。自动化流水线的制程管理、计算机代替人工作等都需要采集大量信息，而信息采集的源头就是传感器，“工业 3.0”及信息技术对传感器有较大需求。正因为如此，20 世纪 80 年代世界工业发达国家都极其重视传感器的研究、开发和应用，并把它定为国家优先考虑的重大科技项目。美国 22 个国家重大发展项目中涉及传感器的就有三个项目，并将“传感器及信号处理”列为对国家安全和经济发展有重要影响的关键技术；西欧各国把传感器技术作为优先发展的重点技术；日本把传感器列为六大核心技术之一。美、日等国社会劳动力总数的一半以上，从事信息工作，美国直接在传感器领域工作的人员已占科技人员总人数的 25%。传感器的需求量不断增加，至使 80 年代世界各国几乎同时掀起了一股“传感器热”的风潮，这是“工业 3.0”和信息技术强力牵引的结果。这股传感器热浪也吹到正在改革开放的

中国，我国在多个五年计划中，都把发展传感器技术列为一级学科项目，并在各重点科技攻关项目中，把传感器研究、开发放在十分重要的位置。目前，我国研制生产的敏感元件及传感器共 10 大类，24 小类，6000 多个品种。共有 1688 个厂商，但综合实力较强的骨干企业较少。

2011 年德国在汉诺威工业展览会上提出的“工业 4.0”概念，更多地是针对制造业领域的 CPS(信息物理互联系统)，核心是增加更多传感器以更好地了解设备的工作状态，同时也制造出大量数据，通过大数据和云计算等信息基础设施，把信息从终端市场传递回制造业。“工业 4.0”的实质是将软件、传感器和通信系统集成于信息物理互联系统，通过虚拟与现实世界的交汇，为人们构思、优化、测试和设计产品提供一种更巧妙的途径。由此不难看出，“工业 4.0”不仅需要传感器采集信息和新的数据储存技术，更需要通过算法产生分析能力，从而更好地进行产品设计与制造、资产与产业链管理。

在这一轮“工业 4.0”新工业革命来临之时，我国不失时机的提出了“中国制造 2025”战略，将给我国制造业注入强大的发展动力，也给传感器行业带来无限发展商机。

《中国制造 2025》的精髓是工业化与信息化融合，加快推进我国制造业由大变强，提升我国制造业的国际竞争力。“中国制造 2025”的核心驱动力是抓智能制造，它是解决中国制造业由大国变强国的根本路径。“中国制造 2025”是升级版的中国制造，体现：四大转变、一条主线和八大对策。

四大转变：由要素驱动向创新驱动转变；由低成本竞争优势向质量效益竞争优势转变；由资源消耗大、污染物排放多的粗放制造向绿色制造转变；由生产型制造向服务型制造转变。

一条主线：以体现信息技术与制造技术深度融合的数字化、网络化、智能化制造为主线。

八大对策：推行数字化、网络化、智能化制造；提升产品设计能力；完善制造业技术创新体系；强化制造基础；提升产品质量；推行绿色制造；培养具有全球竞争力的企业群体和优势产业；发展现代制造服务业。

顺应“互联网+”的发展趋势，以信息化与工业化深度融合为主线，国家重点发展的十大领域为传感器转型发展与扩大应用指明了方向，这十大领域是：新一代信息技术；高档数控机床和机器人；航空航天装备；海洋工程装备及高技术船舶；先进轨道交通装备；节能和新能源汽车；电力装备；新材料；生物医药及高性能医疗器械；农业机械装备。

如同“工业 3.0”在世界掀起了一股“传感器热”的风潮一样，“工业 4.0”、“中国制造 2025”也必将为我国传感器从传统型向全新型转型发展提供强大的推动力。

二、传感器是“工业 4.0”和“中国制造 2025”的核心技术

把生产线的各种机器作为底层，并在安装传感器和执行器后，搭建一套应用系统以实现信息处理，从而形成了一套网络世界与物理世界的交互系统，最终实现机器与机器之间、机器与人之间的对话，这便构成了“工业 4.0”、“中国制造 2025”的智能制造。所谓智能制造就是生产全周期从自动化升级成智能化，即扩展到：“工厂+信息系统”替代人的控制；“生产线+ 传感器”替代人的监督；“精密加工装备+ 算法”替代人的技艺。智能制造需要重点解决的是如何将资源、信息、物品和人进行互联，这需要以信息技术、数字化制造技术应用为重点，并依托传感器技术为基础，打造全面而先进的系统架构。智能制造要求每一个工厂都应有一套智能系统，它首先能够通过传感器，对生产线数据进行采集，并加以分析，从而实时地了解产品制程的运作情况；而后通过安装在流水线机器上的传感器和执行器，对产品制程进行控制和管理。从机器的使用与维护角度看，智能制造需要通过传感器采集机器的使用数据，从而更好地了解机器被使用的情况，以便安排对机器的维护服务，并对机器的设计提出改进意见。由于传感器涉及生产过程的每一个阶段，提供原始数据以及控制系统所需要的反馈，所以传感器在很大程度上影响和决定着自动化、智能化生产系统功能的实现。由此不难得出，传感器是智能制造的核心技术，也将是落实“工业 4.0”、“中国制造 2025”的一个重要抓手。

三、“工业 4.0”和“中国制造 2025”对传感器的新要求

从互联网企业角度看，自身要发展必须实现与包括工业企业在内的各行各业协同发展，所以叫“互联网+”；从工业企业角度出发，将其称之为协同创新阶段，传感器与互联网、传感器与“工业 4.0”、传感器与“中国制造 2025”就是相互协同创新发展的促进与带动关系。传感器是物联网、“工业 4.0”、“中国制造 2025”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，“中国制造 2025”正进入实施期，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、“工业 4.0”、“中国制造 2025”的根基是传感器，也就是说发展物联网，落实“工业 4.0”、“中国制造 2025”体系，首先应发展各种各样功能的传感器。

目前制造业的概念和附加值正在不断从硬件、设备、生产资源等有形资产向软件、服务、解决方案等无形资产转移，服务化已经成为引领制造业产业升级和保持可持续发

展的重要力量，是制造业走向高级化的重要标志之一，同时也是传感器技术发展的大好时机。

“工业 4.0”、“中国制造 2025”对传感器总的要求是：便携、节能、环保。具体要求是：

- ①微型化（体积小、高度低、重量轻）；
- ②网络化（适应有线或无线传感器网络节点要求）；
- ③智能化、无线化，即有线变无线，实现无线通讯，具有执行计算、检测、通讯等功能和较强的软件功能（如嵌入式数据库系统）等；
- ④非接触测量；
- ⑤低功耗（有利于采用电池或太阳能供电）；
- ⑥抗干扰性能好、耐环境能力强；
- ⑦稳定性好、可靠性高；
- ⑧低成本。

为满足互联网、“工业 4.0”和“中国制造 2025”对传感器的新要求，传感器行业的发展方向是：一部分产品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。转型发展主要是要求传感器的结构与功能具备微型化、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。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、“工业 4.0”、“中国制造 2025”体系的需求。

四、传感器转型发展及新产品研发方向

传感器由传统型向全新型的转型发展，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，首先要研制出微型化、高阻值或大灵敏系数的电阻应变计。为实现传感器的微型化和低功耗，处于国际传感器市场引导地位的企业，先后研发出微型高阻应变计和大灵敏系数薄膜应变计。其中，美国 VISHAY 公司 M-M 事业部的产品最具代表性。

1. 微型化、低功耗应变式传感器的重要基础——高阻值电阻应变计

美国 VISHAY 公司 M-M 事业部，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。采用先进的生产工艺，做到减小敏感栅面积和增大电阻值，在很小的敏感栅面积上，制造出 5k Ω 、10k Ω 甚至 20k Ω 的电阻应变计。使用

带有温度自补偿性能的 Ni-Cr（卡玛）合金箔材制造敏感栅，新型电阻应变计的灵敏系数为 2.1（标称值），电阻值误差 0.2%。其中，新结构的高阻值微型单轴电阻应变计，可以应用于标准型也可以应用于微型力与称重传感器。电阻应变计敏感栅的总体尺寸可以做到 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ ，而且仍能手工焊接，其结构如图 1 所示。微型高阻全桥电阻应变计的尺寸是 $3.8\text{mm} \times 4.0\text{mm}$ ，每个敏感栅的电阻值都调整到 $5000\Omega \pm 0.2\%$ ，其结构如图 2 所示。

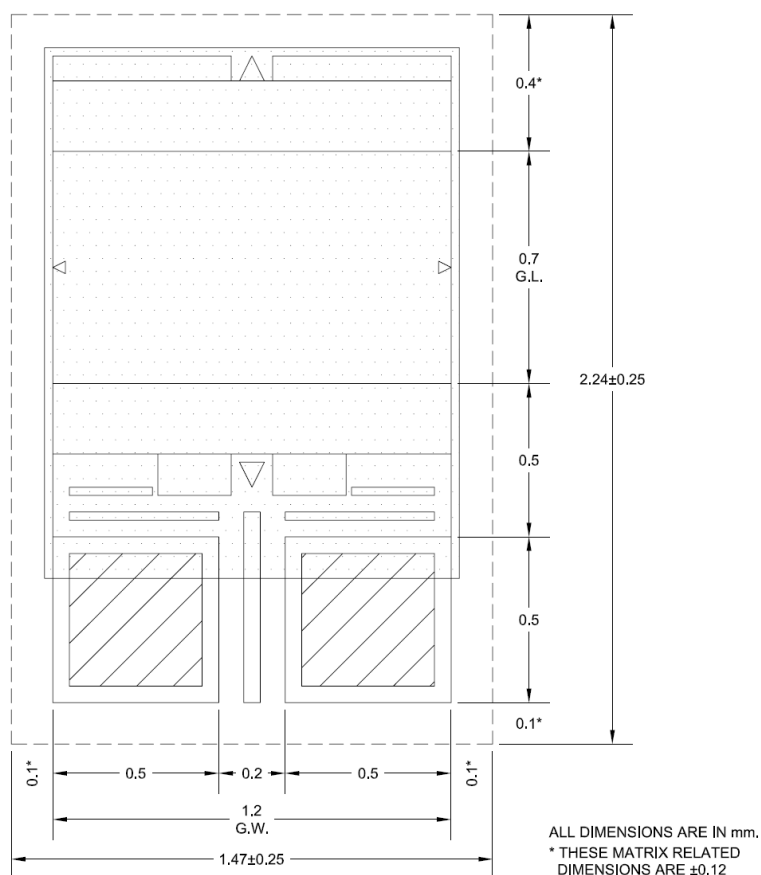


图 1 微型高阻值单轴电阻应变计

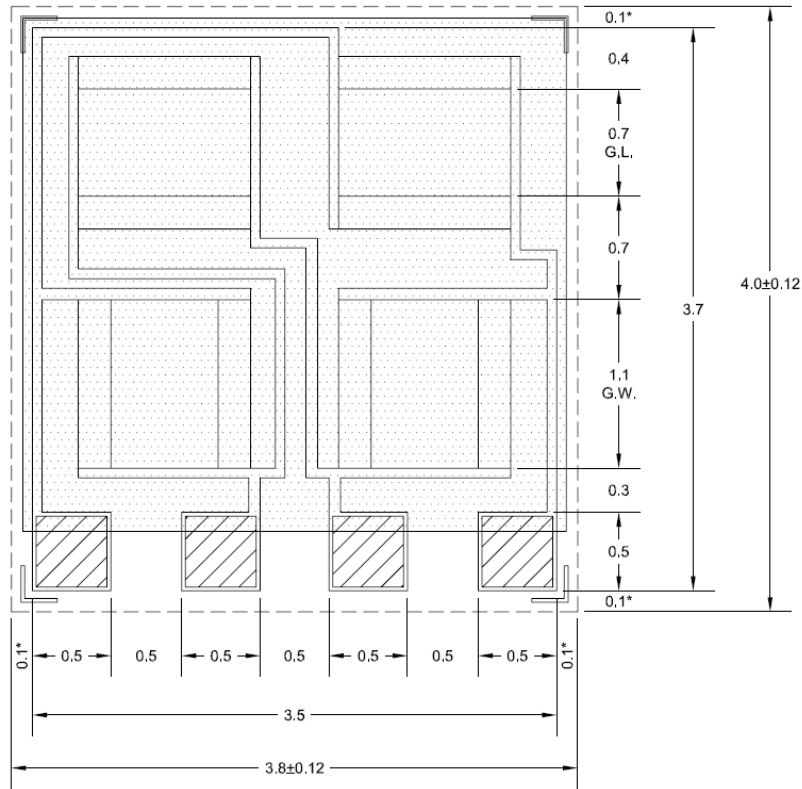


图 2 微型高阻值全桥电阻应变计

微型高阻应变计特点：

高输出——应用比较短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，减小了蠕变误差。

低电流——与普通的应变计比较电桥电流低，这对于压力变送器和带有电池组的仪表来说是至关重要的。

小尺寸——电阻应变计尺寸小到 0.5mm×0.5mm，可用于各种微型传感器。

低成本——由于微型全桥轴电阻应变计面积小，降低了部件成本，连线好焊接相当于单个敏感栅电阻应变计。

2. 大灵敏系数薄膜应变计

薄膜是指衬底上的一层薄膜材料，其厚度在数埃 (Å) 至数微米 (μ)。 ($\text{Å}=10^{-10}\text{m}$, $\mu=10^{-6}\text{m}$)。薄膜的材料有金属、合金、半导体等，可以完全根据需要来选择。分为气相和液相制造薄膜两种方法，以气相化学真空沉积方法应用较多。薄膜应变计是薄膜技术发展的产物，它是采用真空沉积和溅射方法把金属或半导体材料直接沉积在基片上制成薄膜敏感栅，最后再加上保护层，容易实现工业化批量生产。金属薄膜应变计结构如图 3 所示。

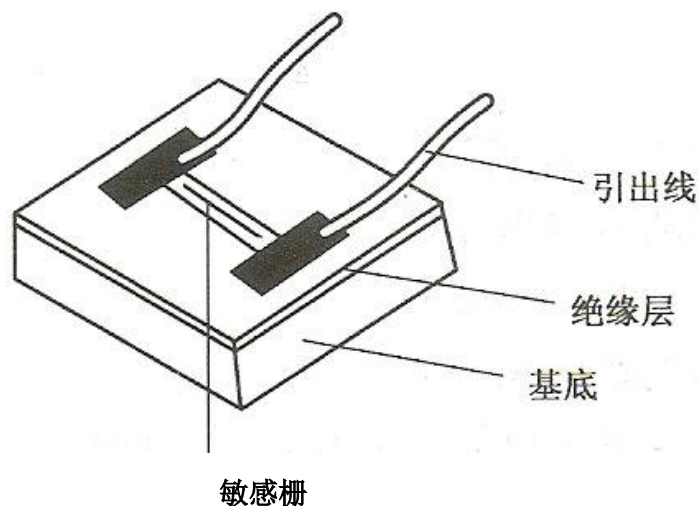


图3 金属薄膜应变计结构示意图

根据敏感栅材料的不同，有金属薄膜和半导体薄膜应变计两种类型。薄膜应变计与体型应变计相比，由于导电机理不同，应变灵敏系数随膜的厚度而变化。

厚度为数埃($\overset{\circ}{A}$)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，具有较高的灵敏系数。厚度 $\overset{\circ}{A}$ 为1000 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。应用薄膜应变计制造传感器的特点是：

- ①薄膜的成分和厚度均匀性好，具有较好的附着力和较小的内应力；
- ②应变灵敏系数大，允许电流密度大；
- ③重复性好，滞后、蠕变误差小；
- ④由于薄膜应变计不用胶粘剂粘贴，计量性能波动小，长期稳定性好，工作可靠性高。
- ⑤工作温度范围广，可在 $-197^{\circ}\text{C} \sim 317^{\circ}\text{C}$ 温度下工作。

3. 工业传感器的种类和研发方向

工业传感器是实现工业自动检测和自动控制的首要环节，在现代工业生产尤其是自动化、智能化生产过程中，要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数，使设备工作在正常状态或最佳状态，并使产品达到最好的质量。工业传感器的种类和应用范围是：

- ①自动化、智能化生产的通用与专用生产装备用各种结构、功能的传感器；
- ②自动化、智能化生产线在线测量与控制用各种结构与功能的传感器；
- ③ 新型结构、新敏感机理、新型功能材料的各种类型传感器。

工业传感器的研发方向是：

微型化——体积小、高度低、重量轻。

集成化——一是传感器与称重计量控制装备合为一体；二是弹性元件与生产线上某一元器件、零部件合为一体。

多功能化——一是传感器本身具有检测、数据处理、显示等功能；二是传感器同时具有力、压力、温度等多参数测量功能。

多分量——例如多分力测试平台、多分量测力传感器等。

无线化——即传感器有线变无线，增加电源模块、采集处理模块、无线收发模块等器件成为无线传感器。

智能化——就是带微处理器、兼有信息检测和信息处理功能的传感器。其突出特点是具有复合敏感功能，即能够同时测量力、压力、温度等多个物理量；自动补偿和计算功能，即只要传感器重复性好，就可以采用多次拟合和差值计算方法进行温度漂移和非线性补偿。

网络化——随着通信技术、嵌入式计算技术和传感技术的飞速发展和日益成熟，无线传感器网络更是得到快速发展，引起传感器企业的极大关注。利用无线数字称重传感器，通过本地无线数字通讯网络、无线数字称重传感器通讯终端与笔记本电脑相连，在无线称重传感器测试软件支持下，完成工业现场自动化远程测试、控制重量信息等任务。

4. 无线传感器与无线传感器网络

(1) 无线传感器

无线传感器，由电源、敏感元件、嵌入式处理器、存储器、通信部件和软件等部分组成。

电源——为无线传感器提供正常工作所必须的能源。

敏感元件——用于感知、获取外界的信息，并将其转换为数字信号。

处理部件——负责对敏感元件获取的信息进行必要的处理、保存，控制敏感元件和电源的工作模式等。

通信部件——承担与其它传感器或观察者的通信。

软件——为传感器提供必要的软件支持，例如嵌入式操作系统、嵌入式数据库等。

无线传感器的结构与传统型基本相同，只是要求结构紧凑、符合安装节点要求、低功耗、密封好、抗干扰能力强。在传统模拟与数字传感器的基础上，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，构成全密封的无线传感器。也有设计成分离型的，即模块单独封装在屏蔽外壳内。

在工作时无线传感器由电池（或太阳能）提供电源。

（2）无线传感器网络

各个无线传感器节点，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。无线传感器网络可以使人们在任何时间、地点和任何环境条件下，获取大量详实可靠的物理世界的信息，这种具有智能获取、传输和处理信息功能的网络化智能传感器和无线传感器网，正在逐步形成 IT 领域的新兴产业。

无线传感器节点包括四个单元：

传感单元——由传感器和模数转换功能模块组成。

处理单元——由嵌入式系统构成，（CPU、存储器、嵌入式操作系统）。

通信单元——由无线通信模块组成。

电源单元——发电装置（高效电池、太阳能及振动发电机等）。

无线传感器网络广泛应用于军事、科研、环境、交通、医疗、制造、反恐、抗灾、家居等领域。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，正受到各国的高度关注。我国《国家中长期科学与技术发展规划》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。无线传感器网络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。

（3）无线传感器的应用

① 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。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。为确保原油达到良好流动性的同时，尽量降低加热的能耗，要求各个节点的温度测量精度较高，一般为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。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。

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。使用无线传感器网络，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。通过对动力响应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，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。判断标准是当桥梁发生病害时，动力系数必然会增大，增大的量级是否在安全工作状态范围内。测量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。

① 高层建筑结构强度健康监测

高层建筑结构极其敏感，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，体积小巧，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。

各节点安装的主要是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。各种无线传感器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的测量数据，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，目前仍以电阻应变式为主，要求全密封结构。

④ 汽车胎压监测传感器

汽车胎压监测系统，由安装在每个车轮内部的一体化结构的压力传感器、温度传感

器、RF 射频芯片、电池电压监测器、低功耗控制器等组成。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。汽车胎压监测系统具有下电、运行、空闲、关断 4 种工作模式。当某一个轮胎的压力或温度超过报警值，仪表盘能够准确显示报警轮胎位置，并发出图形、声音、文字报警。该产品是汽车的安全件，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℃；工作电压范围 1.8~3.6 V。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。汽车胎压监测系统的特点是小型、轻量、灵敏度高、响应速度快、长期稳定性好。

五、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，工业发达国家以研究新型传感器和传感系统为核心，包括应用新传感原理、使用新材料、采用新结构等。研发新型结构、新敏感机理传感器的目的是：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。

相对于金属而言，纳米、半导体、陶瓷、碳纤维和有机材料等，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。微结构传感器的敏感元件尺寸多为厘米级、毫米级。这些微结构与特殊用途的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，新型传感器是集先进的微电子技术、计算机技术、信息技术、制造技术为一体，代表了当前传感器技术发展方向。

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，美国、欧盟、日本等国已经形成了稳定的研发生产团队和用户群体，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

碳纤维(carbon fiber, 简称 CF)，是一种含碳量在 95%以上的高强度、高模量的新

型纤维材料。碳纤维由片状石墨微晶等有机纤维沿纤维轴向方向堆砌而成，经碳化及石墨化处理而得到的微晶石墨材料。碳纤维“外柔内刚”，质量比金属铝轻，但强度却高于钢铁，并且具有耐腐蚀、高弹性模量的特性。碳纤维不仅具有碳材料的固有所征特性，又兼备纺织纤维的柔软可加工性，是新一代增强纤维。

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。碳纤维复合功能材料，可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。

日本 CMC 公司研究出采用纤维直径 $1\mu\text{m}$ 、线圈直径 $10\mu\text{m}$ 的线圈状碳纤维“CMC (Carbon Micro Coil)”电磁波吸收体和触觉传感器。CMC 线圈状碳纤维，除电阻成分外还包括电感和电容成分，这一特性可应用于各种用途的传感器。

CMC 机械弹性好，伸缩时共振频率就会发生变化，所以可作触觉传感器。最小感知压力为 $1\times 10^{-5}\text{MPa}$ 、最小感知位移为 $0.1\mu\text{m}$ 的传感器，可以检测出挤压、接触、抚摩和揉捏等细微变化。

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，经高温 Au 扩散制成硅片。将硅片经单面打磨后、用化学方法镀上 Ni 电极以形成欧姆接触，然后划片、切割、焊接引线和封装制成温敏、光敏、磁敏和力敏 Z 元件。其特点是：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。

六、结束语

“工业 4.0”、“中国制造 2025”的核心是在工业自动化、智能化控制这个环节，主要是通过信息物联系统来实现“智能工厂”和“智能制造”。传感器将涉及智能生产过程的每一个阶段，提供原始数据；提供控制系统所要的反馈。可以说智能生产是从安装传感器到数据驱动的全过程，所以传感器是“工业 4.0”、“中国制造 2025”的核心技术，两者是相互协同创新发展的促进与带动关系。

在新的产业经济环境下，工业领域的结构演变和调整正成为新的经济增长动力，特

别是在“工业 4.0”、“中国制造 2025”的“智能工厂”与“智能制造”正成为带动传感器从传统型向全新型转型升级发展的重要推动力。在这里面需要重点解决的是如何将资源、信息、物品和人进行互联，这需要以信息技术、数字化制造技术应用为重点，并依托传感器技术为基础，打造全面而先进的系统架构。

传感器市场规模之大不容置疑，而我们更应注意到国内正在逐步形成具有国际竞争力的传感器产业体系，RFID、工业传感器、智能终端、网络通信设备等，都将成为未来物联网、“工业 4.0”、“中国制造 2025”的核心领域。应把实施互联网、“中国制造 2025”战略作为企业提升竞争力的关键环节，互联网不再只是企业生产的工具和手段，已成为支撑企业成长的关键要素和支撑平台。称重传感器行业应以互联网思维推进企业转型升级，抓住实施“中国制造 2025”战略难得的发展机遇，加速一部分传感器由传统型向全新型的转型发展速度，并开发新结构、新敏感机理的传感器，打造新的经济增长点。

参考文献

【1】中国政府网. 《“中国制造 2025”发展规划纲要》. 国务院 2015.05.08.

【2】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。

【3】美国 VISHAY 公司 M-M 事业部. New Miniature Strain Gages from Micro-Measurements. 2012.05.

作者简介：刘九卿（1937—），男，汉族，辽宁省海城市。中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所研究员，享受国务院政府特殊津贴专家。现为中国衡器协会技术顾问，衡器技术专家委员会顾问，《衡器》杂志编委。编著《电阻应变式称重传感器》、《国家职业资格培训教程—称重传感器装配调试工》，在有关杂志上共发表学术论文 110 多篇。