

文章编号:1001-4888(2018)01-0085-08

可扩展多功能复合材料结构状态 传感网络的设计与制作技术^{*}

范忠¹, 王奕首², 邱雪琼³, 卿新林^{2,3}

(1. 台州职业技术学院机电工程学院, 台州 318000; 2. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361005;
3. 中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 先进复合材料的使用为大型工程结构减重、提高效能及降低运营成本提供了有效途径, 由于设计、制造与检测技术的限制, 复合材料的优越性能在大型结构上的应用还远没得以充分发挥。本文提出了一种与复合材料结构集成一体的可扩展多功能传感网络技术, 形成复合材料结构多模式传感能力, 使复合材料结构可以“感觉”和“思考”自身状态。为此, 发展了在微观尺度上制作高密度电阻温度传感器、电阻应变片和 PVDF 压电薄膜传感器网络的新方法, 利用可扩展的传感器网络搭载层实现了多功能传感器网络从微观到宏观的扩展。扩展后的柔性传感器网络可覆盖面积大、外形复杂的复合材料结构, 为全面快速评价复合材料结构在制造及使用过程中的完整性提供有效的技术手段。

关键词: 复合材料; 传感器网络; 可扩展; 结构状态传感; 结构健康监测

中图分类号: V25; TB381; TB55 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-249

0 引言

由于复合材料具有高比强度、高比刚度和可设计性等显著优点, 大量使用复合材料是目前世界航空发展的趋势, 先进复合材料正在逐步成为新一代大型民机的主要结构材料^[1-5]。然而各向异性的复合材料在结构形式上具有多样性, 在微观构造上具有不均匀性, 宏观构造上具有呈层性, 再加上所受载荷和使用环境的复杂性, 这些特点使得复合材料结构完整性和耐久性的分析变得非常复杂和困难。以永久安装在复合材料结构表面或嵌入复合材料结构内的传感器网络为基础的结构健康监测是确定结构完整性的革命性创新技术, 利用传感器网络可对发生在复合材料结构上的外界撞击、结构应变以及可能存在的损伤等信息进行监测, 并根据监测获得的信息确定结构健康状况^[6-9]。结构健康监测技术为全面快速评价与确定复合材料结构在制造和使用环境中的完整性提供有效的手段。

文献[10, 11]提出了一种类似人体神经系统的多功能传感器网络, 将不同功能的传感器有机结合起来, 并与复合材料结构集成一体, 用来感知结构应变、温度、湿度、气动压力等物理参量, 并监测发生在结构上的外界撞击及内部损伤。利用这一概念设计和制造的复合材料结构可以提供结构本身多模式的综合信息, 使复合材料结构可以“感觉”和“思考”自身状态, 从而进一步使未来复合材料结构能运转在它们的物理极限状态下, 而不同于设计过程中所使用的隐藏损伤假设及安全系数等预设极限的限制。复合材料结构通常尺寸规模大、形状复杂, 要实现分布式多功能复合材料结构状态传感, 需要设计一种含有

^{*} 收稿日期: 2016-11-18; 修回日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11172053); 台州科技资助项目(No. 2017A12034)

通讯作者: 卿新林, 男, 博士, 教授, 博士生导师, “千人计划”国家特聘专家。主要研究方向: 先进传感技术、结构健康监测、飞行器健康管理技术、智能材料与结构等。Email: xinlinqing@xmu.edu.cn

大量功能元件又不影响复合材料结构自身完整性的传感网络。传统的传感器网络系统以及附带的网络硬件设备由于自身的局限性,不适合大量地集成到复合材料结构上。

本文发展可扩展多功能复合材料结构传感网络技术,形成复合材料结构多模式传感能力。利用可扩展的聚合物搭载层来实现大量微型传感器及功能元件的集成,在搭载层上设计制作微型电阻温度传感器、电阻应变片和 PVDF 压电薄膜传感器,并通过其实现从微观尺度的高密度传感器网络到宏观尺度的大型复合材料结构的扩展。可扩展的传感器网络可覆盖面积大、外形复杂的复合材料结构,且不影响复合材料层状结构,为复合材料结构状态感知提供重要的技术基础。

1 飞行器复合材料结构状态自感知概念

如图 1 所示,将不同类型的传感器有机结合起来,形成类似人体神经系统的多功能传感器网络,并与复合材料结构集成一体,多方位全面感知复合材料结构的状态,使复合材料结构具有“感觉”和“思考”自身状态的感知能力,这就是复合材料结构状态自感知概念。复合材料结构状态自感知能力将对复合材料结构航空飞行器的设计与制造、运行及维护产生革命性的影响,它的应用可以提高飞行器的安全可靠、减轻飞行器的重量、缩短维护停飞时间、显著降低运营与维护成本。

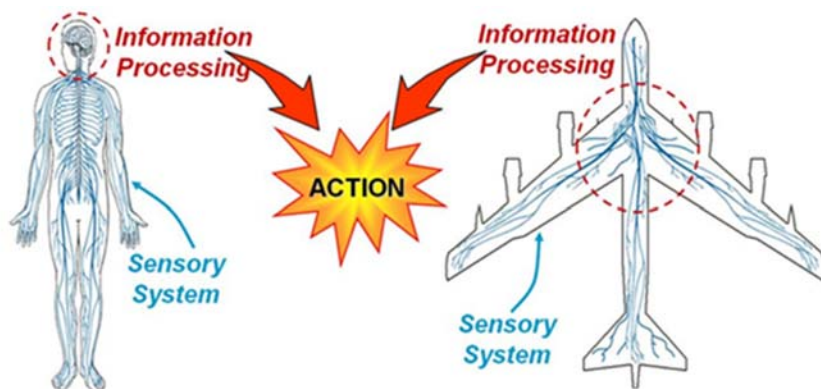


图 1 复合材料结构状态自感知示意图

Fig. 1 Vision of composite structure state sensing

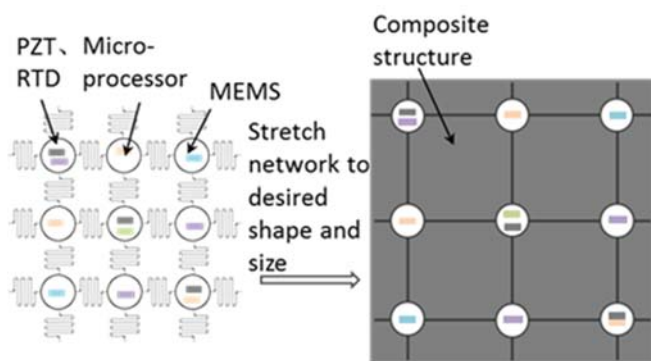


图 2 可扩展的多功能传感器网络

Fig. 2 Expandable multifunctional sensor network

要实现复合材料结构状态的自感知,需要设计一种含有大量传感元件又不影响复合材料结构自身完整性的传感器网络。如图 2 所示,借鉴纳米和微电子集成电路设计工艺,将聚酰亚胺高聚物薄膜加工成可伸展的微线网络,去除网线以外的多余基底材料,微线自身的材料分量少到可忽略。微线具有极强的伸展能力使得网络能覆盖较大面积,通过在各个方向上的均匀拉伸,将网络从微观大小扩展到宏观尺度^[11-15]。如在功能节点上放入多种

类型的传感器、激励源、电子元件或其他功能材料,利用微线连接功能节点,形成的传感器网络,并将其集成到复合材料结构上,就能使复合材料结构具有类似人体神经的自感知功能。

上述设计的传感器网络搭载层具有多种优点,包括:(1) 传感器网络自身材料少,对复合材料结构几乎无影响;(2) 能在较小应变下实现大的扩容;(3) 容易批量加工制作;(4) 柔韧的高聚物材料使得网络搭载层的形状适应能力强;(5) 基于可扩展性网络搭载层的传感器系统方便与材料集成,所有功能元件能一次性地被埋入复合材料结构中。

2 可扩展多功能传感网络设计与制造技术

2.1 可扩展传感器网络搭载层的设计与工艺

通过一种由微线-微节点单元组成的可扩展聚合物搭载层,可集成高密度的纳米/微米等微观尺度的功能元器件,例如智能纳米材料、传感器、激励器、先进电子设备、处理器等。传感器网络搭载层的设计原理如图3所示,微线是由一系列的曲线和连接曲线的直线段组成。通过在网络边界施加力,微线即沿着拉伸方向展开。网络沿各个方向打开后即可实现扩展,覆盖更大的面积。曲线段部分的设计可使它在较低局域应变下实现大的伸长率。通过控制沿微线拉伸方向所施加的力来设计网络的扩展率。为防止搭载层的微线在自重下不必要地自动打开,设计了一种连接各微节点的加强线,如图3中的交叉直线。加强线较之微线要细得多,因此在需要打开网络的时候,加强线将被拉断,从而允许微线的伸展。

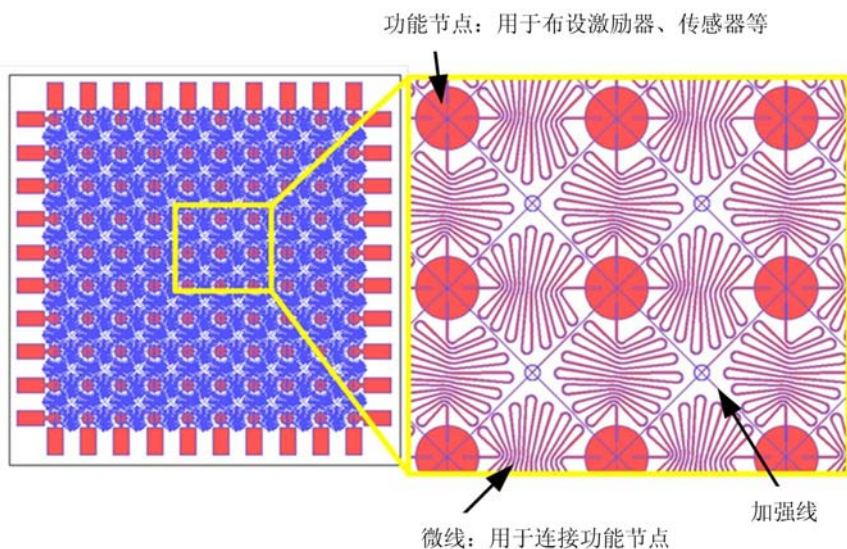


图3 传感器网络搭载层设计示意图

Fig.3 Schematic of the substrate of sensor network

通过借鉴微纳加工工艺,采用光刻的方法将聚酰亚胺薄膜加工成上述设计的传感器网络搭载层。制作工艺流程如图4所示,具体描述如下:

- (1) 清洗基底玻璃与聚酰亚胺薄膜:用去污粉清洗玻璃、聚酰亚胺薄膜表面,然后依次放在装有去离子水-丙酮-酒精-去离子水的烧杯中,分别超声清洗30分钟,最后放在70℃烘箱中烘干24小时;
- (2) 在玻璃基底上旋涂NR 9-1500 PY光刻胶;
- (3) 将聚酰亚胺薄膜粘贴于已涂胶玻璃基底上,经高温下热压使聚酰亚胺平整;
- (4) 在聚酰亚胺薄膜上旋涂SUN 9i光刻胶;
- (5) 曝光5秒;
- (6) 显影80秒(SUN 9i的显影液SUN 238D,显影期间不断搅动,然后放入去离子水中清洗10秒,最后用氮气吹干表面);
- (7) 溅射200nm阻挡层Cr;
- (8) 去胶:用丙酮、异丙醇、去离子水各超声振荡5分钟,去除SUN 9i光刻胶;
- (9) 在O₂氛围中反应离子刻蚀6小时,刻蚀完成后,放入丙酮中去除NR9-1500 PY光刻胶,使图案化后的聚酰亚胺从玻璃基底上脱离下来,放入去离子水中清洗聚酰亚胺,最后放入烘箱中烘干,得到所需的搭载层。

图5显示了二维可扩展搭载层扫描电子显微(SEM)图像。微线的粗细为16.5μm,厚25μm,微节点直径为800μm,搭载层自身的尺寸和重量小到可忽略。

所设计制作的传感器网络搭载层质轻、柔软,可很好地附在任意三维形状的结构上,其实物照片如

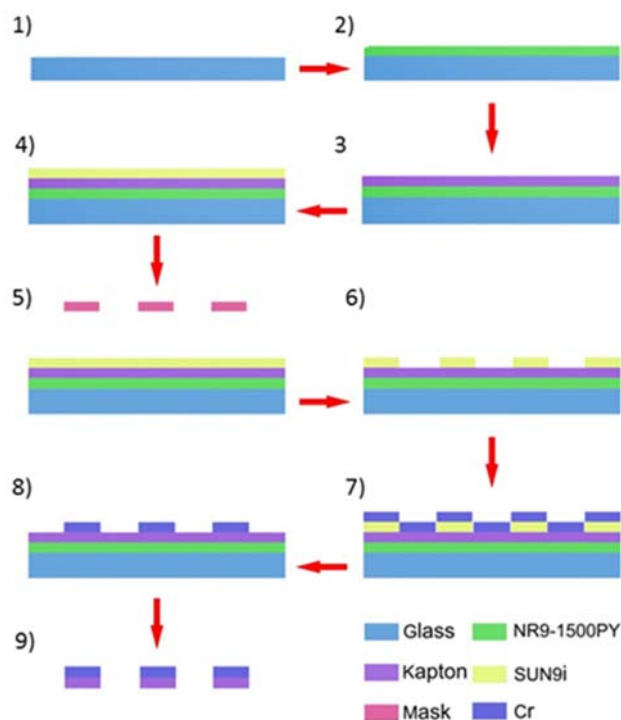


图 4 传感器搭载层的制作流程

Fig. 4 Fabrication process of the substrate of sensor network

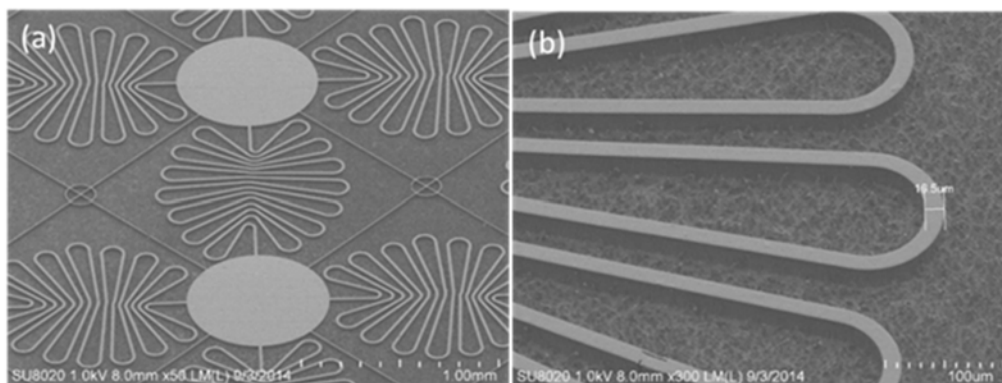
图 5 可扩展搭载层的 SEM 图,标尺分别为(a)1000 μm , (b) 100 μm Fig. 5 SEM images of the expandable substrate with the scales of (a)1000 μm , (b) 100 μm

图 6 所示。通过 X,Y 方向的拉伸,可将搭载层中的微线拉直,实现网络的扩容。完全打开后的搭载层在每个维度上可实现超过 10 倍的伸展,使得网络实现超过 100 倍的扩容。

2.2 微型传感器的设计与制作

本节主要介绍电阻温度传感器、应变传感器以及压电薄膜传感器等几种主要微型传感器的设计与制作技术。

(1) 电阻温度传感器(Resistance Temperature Detector, RTD)

采用 Pt 制作薄膜型微型温度传感器,具体制作步骤如下:

a) 选择基片:选用 5cm $\times$ 5cm 的聚酰亚胺基片材料,作光刻用;

b) 清洗基片:依次用丙酮和乙醇浸泡 5 分钟,然后用去离子水反复冲洗 5 次;

c) 烘片:用热板将聚酰亚胺基片烘干,温度为 150 $^{\circ}\text{C}$,烘片时间为 60 秒;

d) 匀胶:将聚酰亚胺基片真空吸附后,用吸管均匀涂覆 NR9-1500PY 光刻胶,然后旋转基片,转速为 5000 转/分钟,时间为 60 秒;

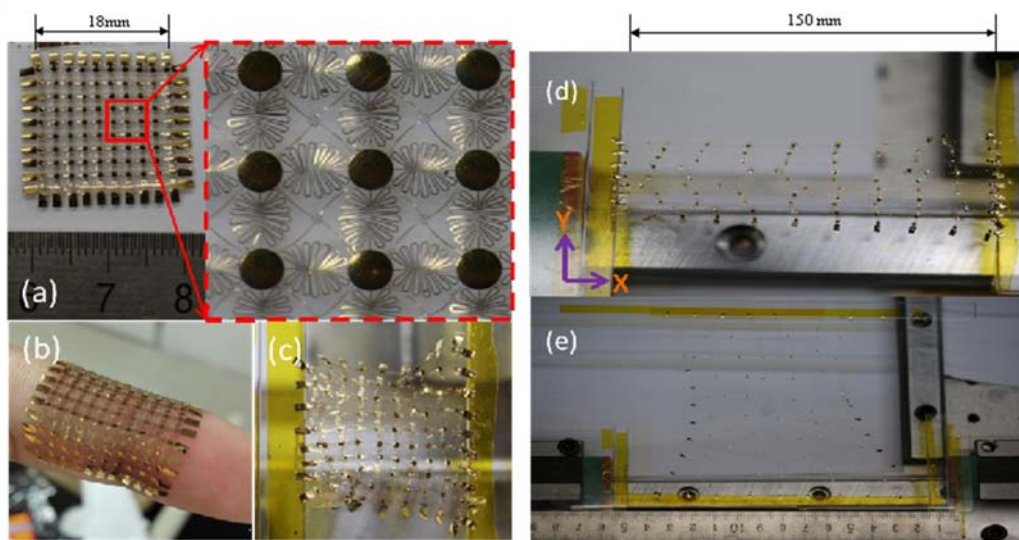


图 6 可扩展传感器网络搭载层

Fig. 6 Stretchable substrate of sensor network

- e) 前烘:将带有光刻胶的聚酰亚胺基片进行烘胶,温度为 150°C ,时间为 60 秒;
 f) 真空曝光:采用 MA6 紫外曝光机,曝光时间 8 秒;
 g) 后烘:用热板烘片,温度为 100°C ,时间为 90 秒;
 h) 显影:先将聚酰亚胺基片浸泡于 RD6 显影液中,浸泡时间为 30 秒,接着放入去离子水中浸泡 60 秒,最后用氮气吹干;
 i) 扫胶:将光刻好的聚酰亚胺基片放置于等离子体去胶机中清理残胶;
 j) 金属镀膜:采用磁控溅射镀 Pt 金属,直流功率 100W,氩气流量 100sccm,时间为 30 分钟,溅射后 Pt 厚度约 350 纳米;
 k) 剥离:用丙酮浸泡带有金属镀层的聚酰亚胺样品,去除传感器外的 Pt 金属,并用去离子水清洗干净,然后氮气吹干,最终得到温度传感器基片。

(2) 微型应变传感器

用传感器掩模板进行光刻,采用类似微型温度传感器的加工工艺,并结合康铜合金热蒸镀工艺,得到微应变传感器。

(3) 聚偏二氟乙烯(PVDF)压电薄膜传感器

首先采用光刻法和磁控溅射获得底部金电极,然后采用光刻和热蒸镀方法蒸镀高分子 PVDF 得到 $25\mu\text{m}$ 厚的薄膜。最后采用光刻和磁控溅射法获得顶部金电极。

2.3 多功能传感器网络的集成

对于多功能传感器网络,需要将多种类型的传感器有机集成起来。采用类似上述的工艺方法,先按照传感器布设方案在对应的功能节点位置加工一种传感器,再将制作好传感器的节点通过阻挡层进行保护,进行第二层加工,制作第二种传感器,以此类推。这样可以在可扩展网络的同一功能节点上加工制作多种类型的微型传感器,或在不同功能节点上制作同一类型或不同类型微型传感器。

图 7 显示了集成温度、应变和压电传感器三种不同传感功能的可扩展传感器网络,同时实现复合材料结构温度、损伤、撞击等状态的监测。图 7(b)(c)(d)分别显示了在可扩展聚酰亚胺搭载层上光刻后形成的 RTD、微应变传感器和 PVDF 压电薄膜传感器,传感器通过镀金的可伸展微线进行连接,以实现信息的传输。

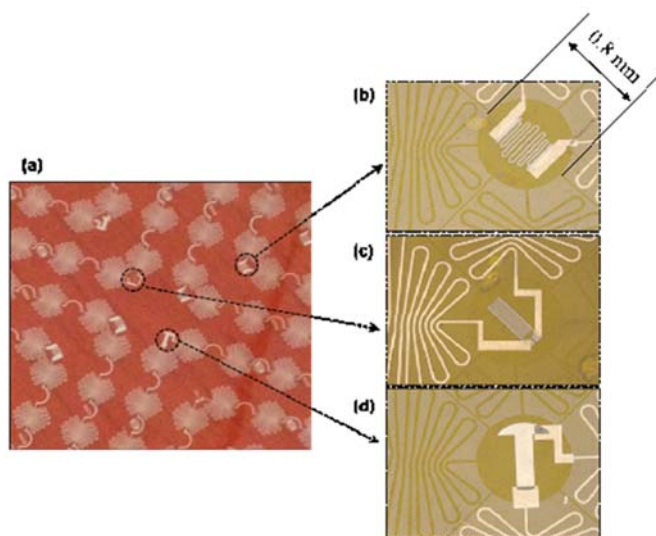


图 7 集成温度、应变和压电传感器的可扩展多功能传感器网络

Fig. 7 Multifunctional sensor network integrated with RTDs, resistance strain gauges and PVDF film sensors

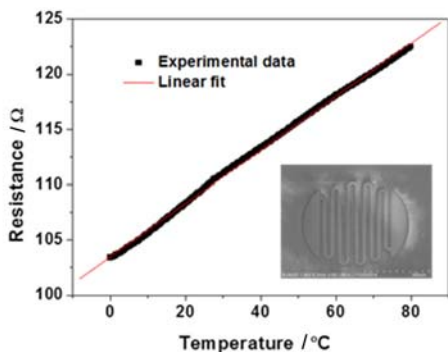


图 8 微型温度传感器的 SEM 图及电阻—温度关系

Fig. 8 SEM and the characterization of RTD temperature sensor

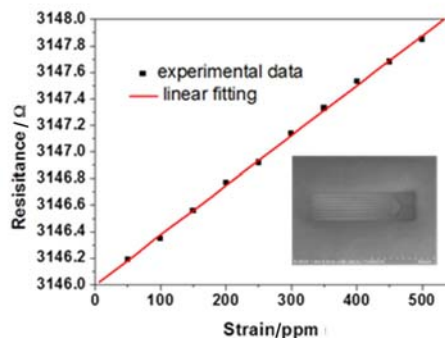


图 9 微型应变传感器的 SEM 图及电阻—应变关系

Fig. 9 SEM and the characterization of strain gauge

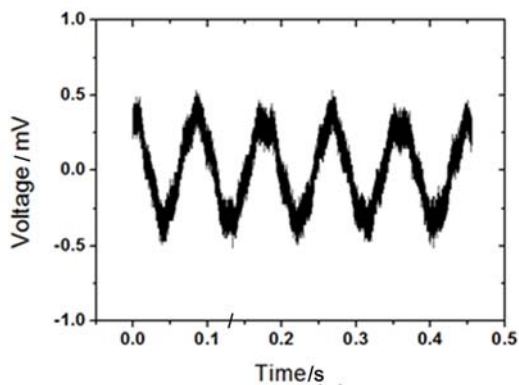


图 10 10Hz 激励下 PVDF 压电薄膜传感器的响应曲线

Fig. 10 The response curve of PVDF film sensor under 10Hz actuation

3 微型传感器性能测试

利用上述工艺制作的微型温度传感器的电阻—温度关系及 SEM 图如图 8 所示,温度传感器尺寸 $500\mu\text{m}$ 。由图 8 可见,微型温度传感器在 $0^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 区间具有很好的温度—电阻线性关系。图 9 显示了制作的微应变片的电阻—应变特性曲线与 SEM 图,所制作的微应变传感器具有很好的电阻—应变线性关系。通过施加 10Hz 激励频率的振动, PVDF 压电薄膜传感器的响应曲线见图 10 所示。

4 可扩展多功能传感器网络与复合材料结构的集成

可扩展多功能传感器网络一旦设计和制造完成,需要将其粘贴在结构表面或者埋入复合材料结构中,对结构全寿命周期的状态进行实时监测,使结构具有自感知功能。根据所要监测的结构或材料及监测部位的不同,需要有针对性地设计传感器网络与主结构之间的集成方法。

传感器网络与复合材料结构相集成的关键有两点:一是需要一种大型传感器网络布设的创新方法,满足传感器网络从微观尺度到宏观尺度的过渡变化,二是搭载传感器网络的薄膜层材料的性能要适应恶劣的制造环境。这里借鉴 SMART Layer 的概念^[7],提出一种载体膜作为网络化传感器搭载层,构成多模式感知层,完成在大面积结构上布设传感器网络,具体集成步骤如图 11 所示。传感器网络可以粘贴在复合材料结构表面或在制造过程中嵌入复合材料结构内部。

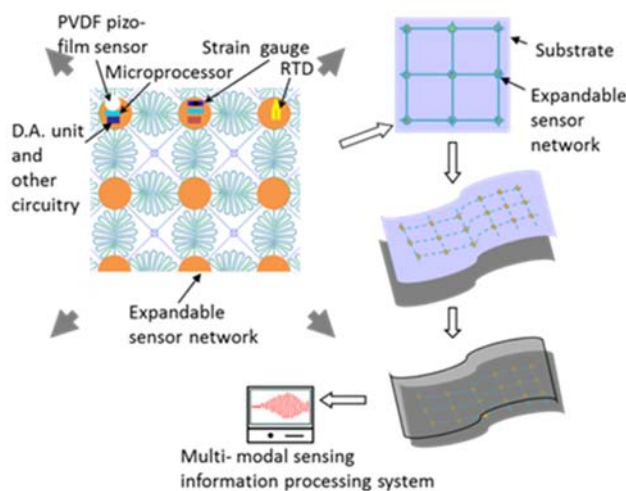


图 11 传感器网络与复合材料结构集成过程示意图

Fig. 11 Integration of sensor network with composite structure

5 结论

本文提出了一种与复合材料结构集成一体的可扩展多功能传感器网络,形成复合材料结构多模式感知能力,使复合材料结构可以“感觉”和“思考”自身状态。发展了可扩展的传感器网络搭载层的设计原理及制作工艺,并在微纳米尺度上设计制作了微型电阻温度传感器、微型电阻应变片和 PVDF 压电薄膜传感器,同时在微观尺度上对上述传感器进行集成,制作出了高密度柔性传感器网络,经扩展后该传感器网络可覆盖面积大、外形复杂的复合材料结构,对任意复合材料结构具有高适应性。可扩展多功能传感器网络可为全面快速评价复合材料结构在制造及使用过程中的完整性提供有效的技术手段。

致谢 本文工作得到了国家自然科学基金项目(No. 11172053)的资助。北京纳米能源与系统研究所潘曹峰研究员与翟俊宜研究员帮助完成了传感器网络搭载层及微型传感器的制造,在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12 (DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1):1-12 (in Chinese))
- [2] Quilter A. Composites in aerospace applications [R]. HIS White Paper, 2005.
- [3] 陈绍杰. 浅谈空客 A380 的复合材料应用[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(4):1-4 (CHEN Shaojie. Application of composite materials in A380[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2008, 33(4):1-4 (in Chinese))
- [4] 范玉青, 张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的新进展——飞机制造技术的新跨越[J]. 航空学报, 2009, 30(3):534-542 (FAN Yuqing, ZHANG Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology-advance of aircraft manufacture technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,

- 2009, 30(3):534—542 (in Chinese))
- [5] Marsh G. Airbus A350 XWB update [J]. Reinforced Plastics, 2010, 54(6):20—24.
 - [6] Qing X, Beard S, Ikegami R, et al. Aerospace applications of SMART Layer technology[M]. Encyclopedia of Structural Health Monitoring. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
 - [7] Qing X, Beard S, Kumar A, et al. Stanford multi actuator-receiver transduction (SMART) layer technology and its applications[M]. Encyclopedia of Structural Health Monitoring. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
 - [8] Lee B C, Staszewski W J. Modeling of Lamb waves for damage detection in metallic structures; part II. Wave interactions with damage[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12:815—824.
 - [9] Qing X, Beard S, Kumar A, et al. Advances in the development of built-in diagnostic system for filament wound composite structures[J]. Composite Science and Technology, 2006, 66:11—12.
 - [10] Qing X, Ikegami R, Beard S, et al. Multifunctional sensor network for structural state sensing[C]. Proc. of SPIE, 2010.
 - [11] 卿新林, 王奕首, 高丽敏, 等. 多功能复合材料结构状态感知系统[J]. 实验力学, 2011, 26(5):611—616 (QING Xinlin, WANG Yishou, GAO Limin, et al. Multifunctional structural state sensing system for composite structures[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):611—616 (in Chinese))
 - [12] Markmiller J, Chang F-K. Sensor network optimization for a passive sensing impact detection technique[J]. Structural Health Monitoring, 2010, 9(1):25—39.
 - [13] Lanzara G, Salowitz N, Guo Z, et al. A spider web-like highly expandable sensor network for multifunctional materials[J]. Advanced Materials, 2010, 22(41):4643—4648.
 - [14] Guo Z, Kim K, Lanzara G, et al. Bio-inspired smart skin based on expandable network[C]. Structural Health Monitoring 2011-Condition Based Maintenance and Intelligent Structures, Stanford, CA, 2011:1717—1724.
 - [15] Salowitz N, Guo Z, Kim S, et al. Micro-fabricated expandable sensor networks for intelligent sensing materials [J]. Invited Paper, IEEE Sensors Journal, 2014, 14(7):2138—2144.

Design and manufacture technology of expandable multifunctional composite structure state sensing network

FAN Zhong¹, WANG Yi-shou², QIU Xue-qiong³, QING Xin-lin^{2,3}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Taizhou Vocational Technical Institute, Taizhou 318000, China; 2. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute of COMAC, Beijing 102211, China)

Abstract: The use of advanced composite materials can provide an effective way for reducing weight, improving efficiency and decreasing operating costs of large engineering structures. Because of the limitation of design, manufacturing and detection technology, the superior performance of composite materials is still far from being fully utilized in large engineering structures. In this paper, an expandable multifunctional sensing network integrated with composite structure is proposed to form multimodal sensing capability of composite structures, so that composite structure can “feel” and “think” its own state. For this reason, on the microscopic scale, new methods were developed for fabrication of high density resistance temperature sensor and resistance strain gauge as well as PVDF piezoelectric thin film sensor network, the expansion from microscopic scale to macroscopic scale of multifunction sensor network was realized by using expandable sensor network carrying layer. After expansion, flexible sensor network can cover composite structure with large area and complex appearance, which provides an effective method to evaluate the integrity of composite structure in process of manufacture and use.

Keywords: composite; sensor network; expandable; structural state sensing; structural health monitoring