

航空气动阀门服役相对位移监测研究



吕伟¹, 赵子平¹, 张璐¹, 李星亮², 卢少微¹

1. 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136

2. 航空工业北京航空精密机械研究所, 北京 100076

摘要:气动阀门已应用于各种工业领域,气动阀门出现故障将对整个系统的运行造成直接影响,因此对气动阀门进行在线监测非常必要。目前,对于气动阀门位移监测的相关研究较少。本文使用溶液浸渍法设计了具有大应变范围、良好动态反应能力的CNT/TPU柔性应变传感器,讨论了传感器的传感机制以及工作原理并对传感器进行了性能测试。在对气动阀门位移监测过程中,该传感器运行稳定。结果表明,该传感器可以对服役过程中的气动阀门进行实时相对位移监测。

关键词:CNT; 气动阀门; 相对位移; 柔性传感器; 监测

中图分类号:TB34

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2021.09.006

随着航空航天领域的发展,飞行器技术越来越受到人们的关注^[1]。飞行器通过内部精密仪器提供准确可靠的位置、速度和高度信息,用于了解和调整飞行时的状态。因此,对于精密仪器的在线监测也是必不可少的,可以在飞行中准确地判断精密仪器的损坏,从而及时地避免危险。目前,气动阀门已经被广泛使用在航空、石油、电力、化工、冶金等工业领域中,并构成了自动化系统中不可或缺的一部分。但是气动阀门在使用过程中,由于各种因素的影响下会发生故障,一旦气动阀门出现故障,将对整个系统的运行造成直接影响,因此对气动阀门进行在线监测非常必要^[2]。

理论上来说,气动阀门的研究主要集中在产品设计和反馈上。Lambeck等^[3]讨论了精确线性化控制方法在3/3气动比例压力控制阀中的设计和应用。Schmitt等^[4]提出了气动过程控制阀的完全非线性模型,它可以用作开发整个过程的精确控制方案的工具,和/或便于“智能”过程控制阀中控制参数的调整。在方法定位上,气动阀门的研究主要集中在故障分析和控制优化上。Nogami、Matsui和Karpenko^[5-7]使用传统的神经网络和多层神经网络技术来处理阀门传感器信号,对阀门部件的响应波形进行分类,并

做出故障判定和预测。本文的研究主要体现在对于气动阀门的设计上以及气动阀门相对位移的监测。

目前,可以应用的传感器有微纳米传感器、压电片、光纤传感器、应变片等。Zhuang等^[8]制备了PU/CNT纤维传感器,用于监测关节运动和面部表情。柴葳等^[9]在热强度试验中引入了一种可以同步测量温度和应变的集成光纤传感器。严中稳等^[10]设计了一种仿生纤毛MEMS微量流速微传感器,量程达100m/s、灵敏度可达0.01m/s。鲍峤等^[11]阐述了压电-导波技术的优势与现状。邢博邯等^[12]从理论方面对Lamb波在航空结构中小损伤检测能力及逆行进行研究。而对于阀门位移的监测,阀门之间微小的缝隙以及大变形量,使得传感器的性能面临挑战。

本文针对航空用气动阀门的特殊结构,设计了一种低成本、易制作的柔性拉伸CNT/TPU传感器制备方法。以热塑性聚氨酯弹性体橡胶(TPU)纤维为基材,通过简单的溶液浸渍法制备了具有良好导电性以及拉阻特性的CNT/TPU柔性应变传感器。所制备的柔性传感器的电阻信号对所施加的机械应变反应迅速,在变形条件下表现出较好的电学性能和力学性能。该传感器具有150%的应变范围,良

收稿日期: 2021-04-28; 退修日期: 2021-05-25; 录用日期: 2021-07-15

基金项目: 航空科学基金(201903054001, 2020Z055054002); 国家自然科学基金(11902204); 辽宁省兴辽英才支持计划(XLYC2007118); 辽宁省自然科学基金(2020-MS-236, 2019JH3/30100017); 沈阳市创新人才支持计划(RC200030, RC190004)

引用格式: Lyu Wei, Zhao Ziping, Zhang Lu, et al. Relative displacement monitoring of an aviation pneumatic valve in service[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(09): 44-49. 吕伟, 赵子平, 张璐, 等. 航空气动阀门服役相对位移监测研究[J]. 航空科学技术, 2021, 32(09): 44-49.

好动态的反应性能。本文将此传感器置入航空用套阀式气动阀门间隙中,进行两套阀结构之间的相对位移监测,保证飞行器气动阀门的正常服役和运行。

1 柔性应变传感器制备与设计

1.1 传感器制备

如图1所示,将0.1mm具有高弹性的TPU纤维浸润到已经制备好的碳纳米管悬浮液中,然后将已经湿润的TPU纤维取出,进行烘干,时间为10min,确保碳纳米管能够附着在TPU纤维中。将这一步骤重复多次,最后从烘箱中取出,即为本研究最终制备的传感器。

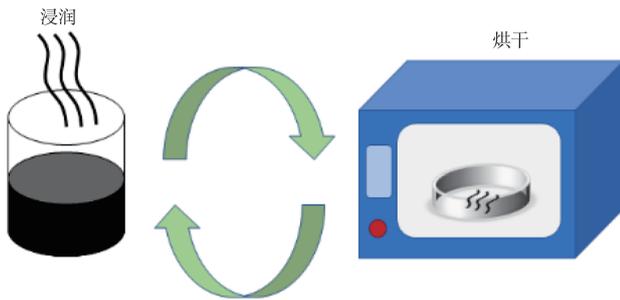


图1 传感器制作过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of sensor production process

针对某气动阀门的特有形式,传感器的设计长度为50mm,通过0.1mm的导线与传感器两端相连,使用胶黏技术将导线与传感器固定在一起,使用PI膜进行封装。使用胶黏技术将封装好的传感器固定在金属阀门上,如图2所示。

1.2 传感器性能测试

图3显示了CNT/TPU传感器的相对电阻与应变的关系。



图2 传感器试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sensor experimental device

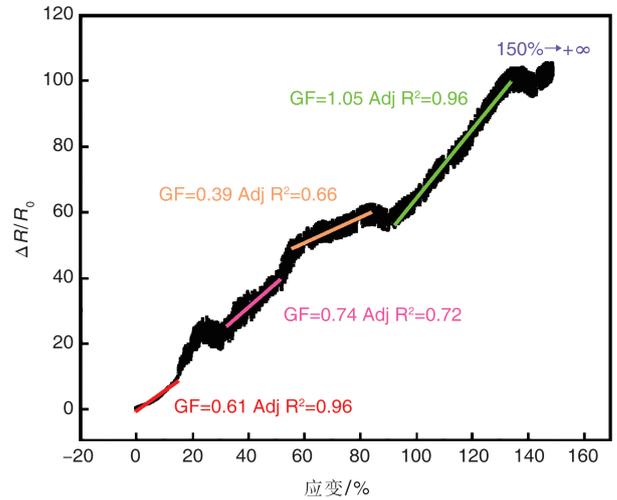


图3 CNT/TPU传感器相对电阻随应变的变化

Fig.3 Change of relative resistance of CNT/TPU sensor with strain

传感器的最大应变范围是150%,相对位移最大测量范围是67mm。此时的相对电阻为100。可将整个拉伸过程分为4个阶段。其中第一阶段以及最后阶段拟合系数均为0.96,灵敏度表示为0.61和1.05。第二阶段和第三阶段拟合系数为0.72和0.66,灵敏度系数分别为0.74、0.39。这表明,在传感器的拉伸开始和结束过程中线性度良好。

图4为传感器在恒定11%应变下的电阻变化率和时间的关系。在恒定应变期间,电阻变化率持续的降低。在下降阶段,电阻变化率会发生一个阶跃再降低,这时的下降速

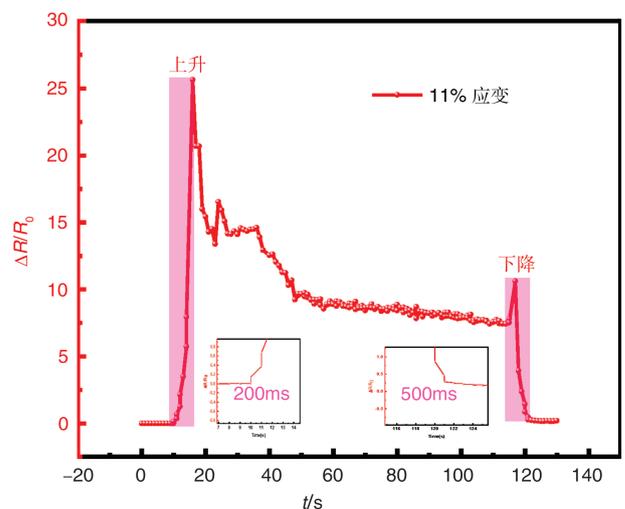


图4 CNT/TPU传感器在恒定11%应变下电阻变化率和时间的关系

Fig.4 Relationship between resistance change rate and time of CNT/TPU sensor at a constant 11% strain

率大于恒定应变时的电阻变化下降速率。在上升阶段,传感器的响应时间为200ms,下降阶段为500ms。

1.3 传感器的表征和工作机理

图5为传感器形貌的扫描电镜图片,其中,图5(a)~图5(b)为原始的CNT/TPU传感器形貌,图5(d)~图5(f)为拉伸之后的CNT/TPU传感器形貌。多壁碳纳米管附着在纤维上连接在一起,形成连续不断的碳纳米管网络,如图5(a)所示。经过不断的浸润之后,碳纳米管从TPU纤维外部形成了三维碳纳米管网络,也存在TPU纤维内部。图5(b)和图5(c)为碳纳米管网络的详细形貌,可以看出无论在图5(b)还是图5(c)中,碳纳米管都连接在一起。拉伸之后的CNT/TPU传感器如图5(d)~图5(f)所示。从图5(d)中可以看出,最初已经形成的碳纳米管网络已经被破坏,部分可能已经恢复,而部分位置无法恢复,形成裂痕,部分错位。图5(e)和图5(f)中可以更明显地观察到上述现象。

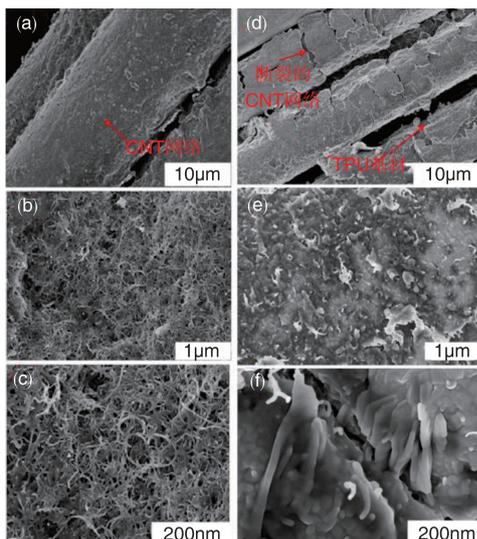


图5 传感器的表征

Fig.5 Sensor characterization

具有一维量子特性的圆柱形碳纳米管具有高的长径比,具有径向纳米级和轴向微米级的性质,其高比表面积使相邻的多壁碳纳米管之间形成典型的团簇和缠绕,形成多向导电网络。当碳纳米管悬浮液不断浸渍到TPU纤维中,会形成随机分散的碳纳米管网络。

这时随机分散的CNT/TPU传感器导电机理可以归因于两个主要来源:一是碳纳米管的自电阻 R_i ,二是碳纳米管的接触电阻 R_j 。其中,接触电阻主要是通过空间中的相邻碳纳米管的电隧穿效应 R_{tunnel} 来激发的,考虑到碳纳米管的随机分布,电隧穿效应主要包括两种机制:(1)由紧密排

列的碳纳米管形成的面内导电网络;(2)由紧密重叠的碳纳米管形成的平面外导电网络。由于碳纳米管接触点之间的空隙区域是由基体填充的,接触电阻比碳纳米管的自电阻高几个数量级。因此, R_i 值可以忽略不计。又因为整个碳纳米管网络可以被认为是 M 个 R_{tunnel} 串联,并且具有 N 个电路的等效电阻排列在一起,因此可得 $R_{\text{总}} \approx \frac{MR_{\text{tunnel}}}{N}$,所以隧道效应是CNT传感器响应的关键因素。

如图6所示,导电网络最初是由相邻的碳纳米管在静态下形成的,无论是碳纳米管的重叠结构,还是由紧密排列的碳纳米管激发的隧道效应,导电网络的布局都与原始的碳纳米管一起识别,提供稳定的电信号响应。随后,当施加拉伸应力时,碳纳米管原始的导电网络结构被破坏,碳纳米管将相应伸长,而紧密排列的碳纳米管也将产生距离。在这种情况下,原有的隧穿电阻会增加,同时也会产生新的隧穿电阻,此时总电阻增大。

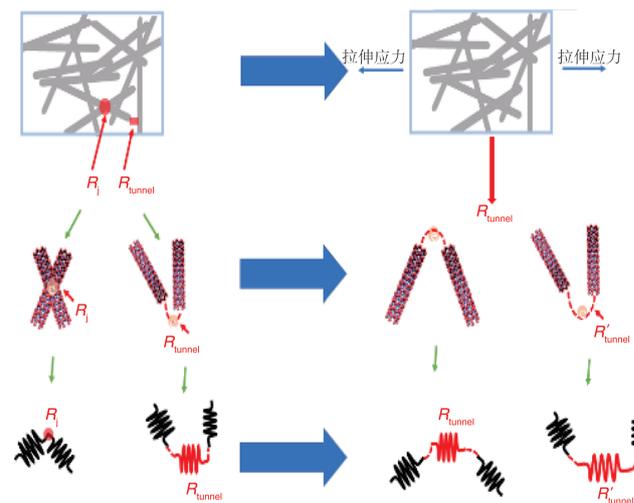


图6 CNT/TPU传感器传感机理

Fig.6 CNT/TPU sensor sensing mechanism

2 气动阀门的位移监测

气动阀门的位移监测如图7~图9所示。图中, $\Delta R/R_0$ 为电阻变化率。

图7为连续的阶梯位移测试,每个位移保持的时间为10s,之后继续提高相对位移。当套筒内外没有发生相对位移时,传感器的电阻变化率为0并且保持不变。当套筒内外发生5mm的相对位移时,相对电阻变化率开始上升,当到达5mm时,秒表开始计时。这段时间内电阻变化率下降,这是由于碳纳米管在纤维中纵横交错,随机分布,当相对位移恒定,网络内部的碳纳米管开始重排,管之间的距离

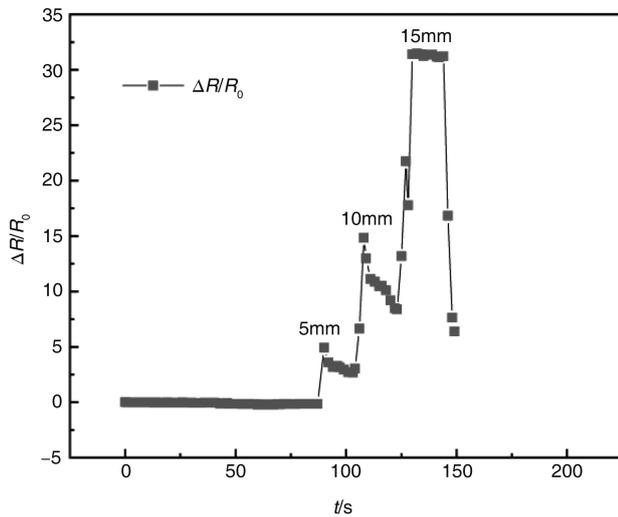


图7 航空用气动阀门阶梯相对位移测试:相对电阻与时间的关系

Fig.7 Aviation pneumatic valve step relative displacement test: the relationship between relative resistance and time

开始缩小,所以在电阻中占据主要地位的隧穿电阻下降,电阻变化率也开始减小。在此时间段内,碳纳米管的重新排列起到了一定的作用。同时,还有许多碳纳米管发生拉伸损坏,碳纳米管的总数量增加,碳纳米管的长度减小,一定程度上减小了隧穿电阻。将相对位移提高到10mm,此阶段的电阻变化率仍然保持下降的趋势,但并没有下降到5mm时的电阻变化率,说明此时的碳纳米管又发生了一次重新排列,有新的碳纳米管发生了损坏。最后,将相对位移提高到15mm,由于提高金属阀门相对位移时,发生了短暂的卡顿,施加的外载荷突然增大,导致了电阻变化率的剧烈变化以及中间的抖动。当气动阀门相对位移缩小到0时,传感器的电阻变化率并没有恢复到零点,是因为气动阀门之间的微小空隙会使传感器出现弯曲,从而无法恢复到原来的状态,所以电阻无法恢复到初始点。

图8为每次相对位移进行了三次连续变化,相对位移的变化为5mm、10mm、15mm。当相对位移为5mm时,有一个最高波峰,以及两个相对低的但是相等的波峰。5mm中最高波峰是由于第一次拉动气动阀门,气动阀门与传感器过盈配合,无空隙或者说空隙较小,从而采用较大载荷,将相对位移拉出超过了5mm。此后两次相对5mm的位移,峰值几乎相等。当相对位移为10mm时,第二次波峰最高,第一次和第三次峰值相当,考虑为外加载荷的拉伸或者气动阀门间隙与传感器之间的挤压,造成了相对电阻变化率的不稳定性。当

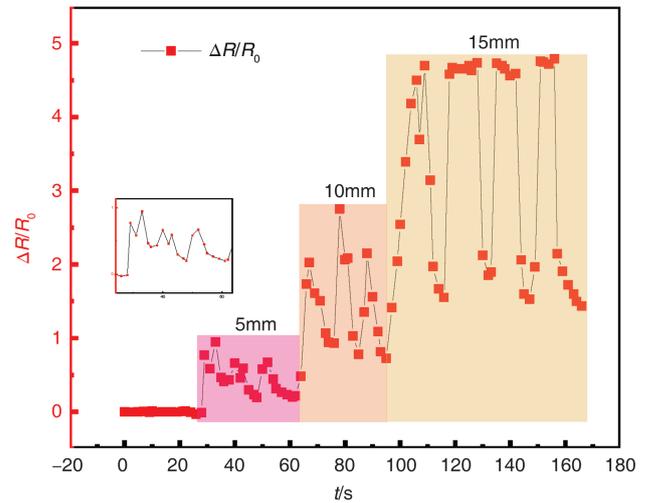


图8 航空用气动阀门重复阶梯相对位移测试:相对电阻与时间的关系

Fig.8 Aviation pneumatic valve repeated step relative displacement test: the relationship between relative resistance and time

相对位移提升为15mm时,第一次的拉伸曲线有一段下降,是阀门上部的底端,与传感器形成了过盈配合,使得位移保持了短暂时间,碳纳米管导电网络重排,使得电阻变化率减小,之后位移到达了15mm,电阻变化率达到波峰。之后的第2~4次,与第一次的相对电阻升降趋势不同,当第一次相对位移产生之后,在下降时,气动阀门以及传感器的结构内部形成挤压,使传感器弯曲,无法恢复到最初的状态,使得传感器的电阻变化率无法回归零点。

图9为相对位移为5mm的重复性试验,每次都是上升到5mm继而下降。5次电阻的波峰值从左到右分别为0.77756、0.91367、0.74851、0.77953、1.02218,5次电阻变化率的波峰平均值为0.84829,可以看到除了第5次远高于平均值,其余4次距离平均值相差不大,5次相对差值的绝对值为0.07073、0.06538、0.09978、0.06876、0.17389,而具有较大位移变化时,电阻变化率的量级均发生在1往上的较大变化,因此可以认为是伸长位移的误差导致波峰的参差不齐而非传感器测试。对于重复性试验,每次上升之前都会有一些微小的波折,是由于航空用气动阀门的特殊结构导致的,缝隙和传感器之间产生了过盈配合。5次的相对位移规律性良好。

3 结论

通过对航空用气动阀门的位移监测的测试,根据监测

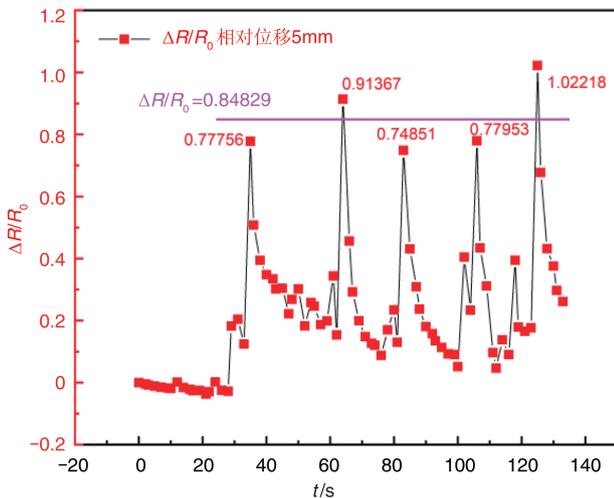


图9 航空用气动阀门相对位移为5mm的重复性测试

Fig.9 Repeatability test of relative displacement of 5mm for aviation pneumatic valve

结果得出以下结论:

(1)监测结果表明,用溶液浸渍法制备的CNT/TPU传感器,具有良好的电学和力学性能,在一定程度上能够置入航空用气动阀门的微小缝隙中,能够快速、准确地反应气动阀门的相对位移变化。

(2)由于航空用气动阀门的特殊结构以及传感器结构在发生微小相对位移时,传感器可以重复使用并且保持高灵敏度,特别是在位移超过了7mm时,灵敏度会提高。当达到最大相对位移时,气动阀门上部即将脱离,传感器容易发生损坏。

AST

参考文献

- [1] 康开华, 才满瑞. 欧洲过渡性实验飞行器项目[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(4): 58-62.
Kang Kaihua, Cai Manrui. European transitional experimental aircraft project [J]. Missile and Space Launch Technology, 2012 (4): 58-62.(in Chinese)
- [2] Yang Y, Xiao C, Yang Y. GRA and AHP analysis of pneumatic control valve failure in an LNG plant[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020,46(2):1819-1830.
- [3] Lambeck S, Busch C. Exact linearization control for a pneumatic proportional pressure control valve[C]//IEEE, International Conference on Control and Automation, 2010.
- [4] Schmitt R, Sobrinho M. Nonlinear dynamic modeling of a pneumatic process control valve [J]. IEEE Latin America Transactions, 2018, 16(4): 1070-1075.
- [5] Nogami T, Yokoi Y, Kasai M, et al. Failure diagnosis system on pneumatic control valves by neural network[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1993.
- [6] Matsui T, Nogami T, Yokoi Y. Failure diagnosis for pneumatic control valves by neural network[C]//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks, 1995.
- [7] Karpenko M, Sepehri N, Scuse D. Diagnosis of process valve actuator faults using a multilayer neural network[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(11): 1289-1299.
- [8] Zhuang Z, Cheng N, Zhang L, et al. Wearable strain sensor based on highly conductive carbon nanotube/polyurethane composite fibers[J]. Nanotechnology, 2020, 31(20): 205701.
- [9] 柴葳, 郝庆瑞, 宝剑光. 光纤温度/应变复合传感器及其在800°C高温下的应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(2): 66-71.
Chai Wei, Hao Qingrui, Bao Jianguang. Optical fiber temperature/strain composite sensor and its application at 800°C[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(2): 66-71.(in Chinese)
- [10] 严中稳, 刘武, 梁贺龙, 等. 仿生纤毛MEMS矢量流速传感器的结构设计及仿真分析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(2): 72-76.
Yan Zhongwen, Liu Wu, Liang Helong, et al. Structure design and simulation analysis of bionic cilia MEMS vector flow velocity sensor [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(2): 72-76.(in Chinese)
- [11] 鲍峤, 邱雷, 袁慎芳. 飞行器结构健康监测中压电-导波成像技术的发展与挑战[J]. 航空科学技术, 2020, 31(3): 15-33.
Bao Qiao, Qiu Lei, Yuan Shenfang. The development and challenges of piezoelectric-guided wave imaging technology in aircraft structural health monitoring[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(3): 15-33. (in Chinese)
- [12] 邢博邯, 蔡建, 周智权, 等. 航空结构中Lamb波小损伤监测能力研究 [J]. 航空科学技术, 2021, 32(3): 40-48.
Xing Bohan, Cai Jian, Zhou Zhiquan, et al. Research on lamb wave small damage monitoring ability in aviation structures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(3): 40-48. (in Chinese)

Relative Displacement Monitoring of an Aviation Pneumatic Valve in Service

Lyu Wei¹, Zhao Ziping¹, Zhang Lu¹, Li Xingliang², Lu Shaowei¹

1. *Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China*

2. *AVIC Beijing Precision Engineering Institute Aircraft Industry, Beijing 100076, China*

Abstract: Pneumatic valves are currently used in various industrial fields, but there are still few studies on displacement monitoring of pneumatic valves. In order to understand the relative displacement change of an aviation pneumatic valve in service, this paper adopts the solution immersion method to design a CNT/TPU flexible strain sensor with a large strain range and good dynamic response capability. The sensing mechanism and working principle of the sensor are discussed. In the process of monitoring the displacement of the pneumatic valve, the sensor operates stably. The results show that the sensor can perform real-time relative displacement monitoring of the pneumatic valve during service.

Key Words: CNT; pneumatic valve; relative displacement; flexible sensor; monitoring

Received: 2021-04-28; **Revised:** 2021-05-25; **Accepted:** 2021-07-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation (201903054001, 2020Z055054002); National Natural Science Foundation of China (11902204); Liaoning Revitalization Talents Program (XLYC2007118); Natural Science Foundation of Liaoning Province (2020-MS-236, 2019JH3/30100017); Shenyang Youth Technological Innovation Talent Project (RC200030, RC190004)