

跨介质飞行器的分布式压电无线智能泛在感知研究



刘卓文^{1,2}, 付海岭^{1,2}, 冯天翼³, 黄领才³, 邓方^{1,2}

1. 北京理工大学, 北京 100081

2. 北京理工大学(珠海), 广东 珠海 519088

3. 中航通飞华南飞机工业有限公司, 广东 珠海 519040

摘要:跨介质飞行器在执行海空任务时运行条件苛刻,实时监测飞行器状态以确保其安全稳定运行至关重要。本文针对跨介质飞行器对着水等外部冲击事件监测的关键需求,设计、研制并试验评估了一种用于飞行器关键部位外部冲击监测与评估的低功耗、高响应的无线分布式泛在感知系统。由于冲击的瞬时性与随机性,本文采用了事件触发机制与网络中心请求机制结合的方式,以便在没有冲击发生时展现低功耗,而在被触发时展现高性能。此外,本文对系统的响应性、鲁棒性和能源效率进行了充分的考虑和分析。基于系统的需求和功能,无线传感器系统设计了包括滤波、整流、事件触发、本地处理和无线通信等模块。该系统是在一个印刷电路板上实现的,能准确和及时地捕捉多个感应输入通道(8个通道)。利用该泛在感知系统能够对外部冲击事件的位置与能量水平做出有效估计。该跨介质飞行器的分布式压电无线智能泛在感知系统能够监测运行状态下的冲击事件,识别冲击发生的位置,以及及时发现潜在的结构损伤或安全隐患,保障飞行器的安全稳定运行。该低延迟、低功耗、高响应分布感知系统能拓展至物联网其他应用中,以监测各类罕见、随机和短暂事件。

关键词:跨介质飞行器; 压电陶瓷传感器; 分布式泛在感知; 无线传感网络; 结构健康监测

中图分类号: TP277

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.06.010

跨介质飞行器因需要同时具备水上/陆地起降的跨介质特性^[1],因此,需要承受陆基飞行器固有气动载荷和水上飞行器的水动载荷^[2-3]。其中,跨介质飞行器水上起降属于水动力学中复杂、非线性、强干扰的流-固耦合问题^[4-6],由于水的动力黏度是空气的59倍,密度是空气的800多倍^[7],故其特殊的结构形式和总体布局(船体式设计)与水面环境(包括不同波高、波长和频率分量的风浪和涌浪等)的多变性而衍生的水动力学,比空气动力学更为复杂。此外,由于穿越过程中介质性质的巨大差异,机体上的载荷会突然发生变化^[8]。跨介质飞行器在水上起降、滑行过程中对机体产生的瞬间冲击载荷的分布取决于飞行器与水面的相对速度和位移,其载荷振幅与分布取决于水面环境和飞行器着水区域的局部几何形状。因此,水动力学中水动载荷状态的评估,直接关系到飞行器结构寿命和可靠性。

从飞行器水动力学角度分析,跨介质飞行器以相对速

度着水主要包括三个阶段^[9]:(1)飞行器着水时自由表面时的撞击^[10];(2)飞行器滑水时自由表面产生较大变形的开腔^[11];(3)滑水时开腔闭合后飞行器船底的水下运动^[11]。第一阶段主要是冲击动力学问题,在飞行器入水的初始阶段,由于液体和气体介质特性的巨大差异,抨击过程将瞬间对机体产生巨大的载荷,使跨介质飞行器与自由表面接触的部分遭受短期高强度的压力冲击波^[12]。第二、三阶段的滑水过程中涉及水动力学和物体流-固耦合的相互作用^[13]。这一过程在飞行器机体内部传播,使机体产生塑性变形和振动效应。当飞行器进入水中后,由于自由表面的巨大变形和水动力与飞行器机体之间的流-固耦合作用,机体转子等关键部件表面会发生空化演化和非稳态演变,空化的坍塌将在结构的表面产生相应的损害。压力脉动在机体结构中引起显著的动态响应。因此,跨介质飞行器水上起降过程中飞行器船底区域(跨介质区域)的实时监测,对跨介质飞

收稿日期: 2024-09-09; 退修日期: 2024-12-05; 录用日期: 2025-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(62473051, 62303053, 61933002); 航空科学基金(20230009072004); 北京市自然科学基金(L233003)

引用格式: Liu Zhuowen, Fu Hailing, Feng Tianyi, et al. Distributed wireless piezoelectric smart ubiquitous sensing research for trans-media aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(6): 88-97. 刘卓文, 付海岭, 冯天翼, 等. 跨介质飞行器的分布式压电无线智能泛在感知研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(6): 88-97.

飞行器船底结构状态评估具有重要意义。

复合材料由于其优异的力学性能与轻量化的特点^[14],在航空航天领域得到了广泛应用。在监测方面,压电陶瓷(PZT)传感器由于其机械强度高、频率范围宽、耦合能力强、价格低、体积小、长距离传播的低衰减性而被广泛用于飞行器结构健康监测(SHM)的研究^[15-16]。此外,PZT传感器可以同时用于被动和主动监测^[17]。安雨晴等^[18]利用广义回归神经网络(GRNN)方法,根据导波信号中多维损伤特征参数与裂纹长度之间的定量关系,提出针对裂纹长度定量监测的模型。卷积神经网络(CNN)已经成为许多领域中最先进的神经网络^[19],并在SHM领域进行了应用^[20]。Tabian等^[21]报告了一种基于CNN和被动PZT传感的新型SHM模型,并对冲击定位和表征的网络结构进行了研究和优化,用于复杂复合材料结构的冲击检测、定位和表征。通过对CNN元模型的训练并在复材机身蒙皮部件上进行验证,对不同能量和位置的冲击检测准确率超过95%。

一般情况下,在基于PZT传感器的SHM状态监测系统中需要大量电缆来将数据和能量在各种传感器传输和数据采集设备间传输。高昂的成本和安装困难,以及低操作可靠性往往是使用这些有线系统的主要缺点^[22]。为了克服这些缺点,无线传感网络(WSN)已被广泛研究和采用^[23]。除了提供低成本安装和运行的关键优势外,WSN在实施远程实时状态监测方面还具有低功耗、高灵活性和分布式智能等优点。在SHM系统中整合WSN,最近被各种飞行器制造业所采用^[24]。这两种技术的结合产生了一种完全不同的网络物理方法,它涉及对SHM系统(物理部分)和新引入的WSN系统(网络部分)的考虑^[25-26]。

Fu Hailing等^[27]提出了一个使用PZT传感器和WSN的节能网络物理系统,并为机载飞行器结构健康监测(SHM)进行了设计和试验验证。该试验通过利用主动传感方法,以一发一收(pitch-catch)方式评估结构完整性,利用WSN来协调分布在整个飞行器上的PZT的损伤探测。另外,Fu Hailing等^[28]还设计、实现了一个低功耗、高响应的无线结构健康监测系统,并对其进行了试验评估,用于复材机身的撞击检测。结果表明,它适用于监测许多物联网应用中的其他罕见、随机和短暂的事件。Gianni等^[29]设计了一个低功率(几百毫瓦)和低重量(质量约30g)的基于全球导航卫星系统的无线传感器网络,用于识别飞行器结构中的声发射(AE)事件,以减少重量和降低成本。Wu Jian等^[30]使用无线传感网络对飞行器的强度测试系统进行了设计和研究。开发了基于WSN的多点飞行器强度测试系统,用于真实飞行器起

落架的静态测试。Wilson等^[31]研发了一款新的无线传感器,解决了飞行器的预期结构健康监测和测试需求。另外还介绍了无源无线传感器在地面测试和高空飞行器运行中的潜在应用。Krichen等^[32]设计了一个适合监测飞行器振动的无线传感器网络结构,以便在任何部件达到共振之前做出反应,从而提高飞行安全。Liu Kunchang等^[33]研究了一种基于双向卷积门控递归深度神经网络(Bi-CGDNN)的方法,用于提高WSN中单个监测节点的信号调制识别能力。

然而,虽然基于PZT传感器的无线健康监测技术在航空领域被广泛研究,该技术在跨介质飞行器船底结构健康监测领域的研究仍属空白。本文提出一种基于无线智能感知技术的跨介质飞行器船底关键区域外部撞击结构动力学特性的分布式泛在感知方法。首先介绍分布式压电无线智能泛在感知系统的总体设计与运行原理;然后讨论系统功耗和外部冲击事件的理论模型,展示分布式压电无线智能泛在感知系统在实验室测试下对外部冲击事件的监测能力;最终对本文工作做出总结与展望。

1 分布式无线压电智能泛在感知技术总体设计与运行原理分析

1.1 泛在感知系统的整体构成与运行原理

跨介质飞行器由于其特殊的工作环境需求,对结构的设计强度和运行安全产生了更大的需求。因此,实时分布式泛在感知技术在跨介质飞行器领域具有重大需求。为满足这一关键应用需求,本文提出了一种基于分布PZT传感器的泛在感知技术,如图1所示。

为了监测结构健康状态,同时不影响结构外侧的空气动力学与完整性,压电传感器布置于跨介质飞行器的船底结构内部,监测飞行器结构因外部冲击事件(如着水)导致的结构应力与振动动态。当外部冲击事件发生在飞机特定关键区域时,该区域内的压电传感器能够实时捕捉冲击事件引起的结构振动响应数据,进而分析冲击事件的强度与结构的健康状态。

有线传感器通常布置于飞机引擎等关键部位,但为了避免有线传感器布线导致的结构复杂和安装困难等限制,本文利用无线传感器技术,通过布置在飞行器不同位置的传感器节点实现分布传感器数据的有线采集与无线传输。数据传输至数据处理与存储中心后,可利用中心处理器更强的计算能力,通过机器学习算法等技术^[19],对飞机外部冲击事件进行有效评估与结构完整性分析,给出安全、预警和故障等评估结果。

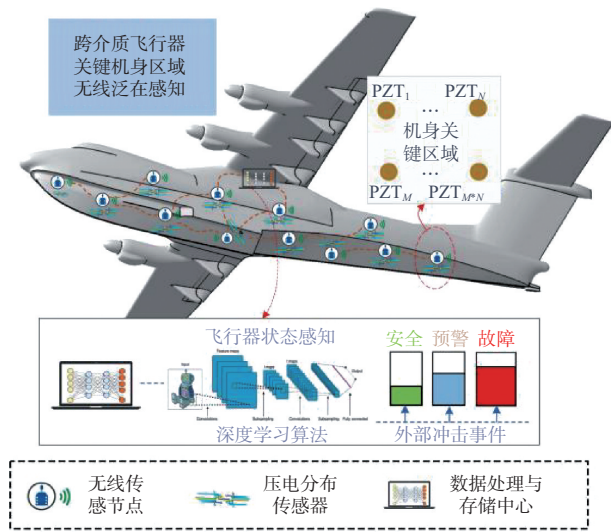


图1 跨介质飞行器关键区域外部冲击分布式泛在感知监测系统构成与运行机理

Fig. 1 Distributed ubiquitous sensing system configuration and operating principle for monitoring critical areas of trans-medium vehicles

1.2 分布式感知节点的设计

无线泛在感知系统中的分布传感器节点实现局部区域的事件监测与数据采集与传输,如图2所示。该传感节点包含多个压电传感器($PZT_1 \sim PZT_N$),分布于飞行器的关键区域,监测外部冲击事件引起的结构振动响应。为了精确完整地获取压电传感器的输出,该无线传感节点还包括一个数据采集子系统,包括滤波模块、整流电路模块、比较器、微处理器和无线数据传输模块。各模块的具体功能如下。

(1) 滤波模块

飞行器运行过程中存在广泛的机械振动与天气条件导致的振动,这对外部冲击事件而言是系统噪声信号。为了减少这些信号的干扰,该传感系统引入了一个高通滤波器模块,滤除小于2kHz以下的系统运行噪声信号,同时能够获取由于外部冲击导致的结构高频响应信息,进而提升系统传感监测的数据精度与可靠性。

(2) 整流电路模块

由于微处理器模数转换器(ADC)只能接收0~3.3V的输出,而压电传感器输出电压为交流信号,因此,需要整流模块将传感器滤波后的交流信号转换成直流信号,以满足微处理器需求。

(3) 比较器

通过设计系统监测阈值 V_d ,确定需要关注的冲击响应时间。当滤波后响应信号超出阈值时,比较器产生触发事件,

启动微处理器采集压电传感器的响应信号。比较器的响应速度是关键设计参数之一,如果系统响应过慢后端微处理器将错过部分关键冲击事件,而如果响应性能过高则会产生较高的系统功耗,影响无线传感系统的长期自主运行。

(4) 微处理器

作为无线传感器节点的核心部件,微处理器主要完成数据采集、预处理和无线传输控制的功能。为了减小功耗,微处理器设置了不同的运行模式,包括休眠、唤醒与处理三个状态,以保证传感性能的同时降低系统的功耗。

(5) 无线数据传输模块

无线数据传输模块是无线传感节点与整个监测网络链接的桥梁,主要完成监测数据的传输与传感请求的接受与处理。该模块也设置了不同的运行模式以降低系统的功耗,并可以通过网络中心以传感请求的方法唤醒。无线模块用于传输处理后的数据。选择时要考虑传输距离和功耗。由于数据已经过本地处理模块的预处理,因此,传输的数据量很小。传输延迟和速率不是优先级。对于无线通信,ZigBee、低功耗蓝牙和Wi-Fi也是可能的选择。ZigBee因其多用途的网络拓扑结构而被采用。

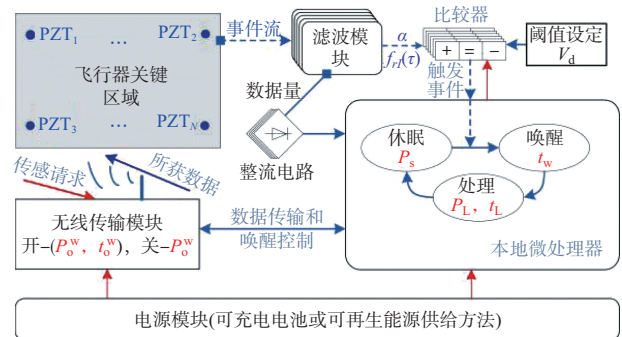


图2 分布式感知无线传感节点构成与运行机制

Fig. 2 Wireless sensor node design and configuration for the distributed sensing solution

(6) 电源模块

电源模块可由可充电电池来实现,但由于无线传感系统分布于飞机难以接触的位置,对电源持久性提出了较高要求。此外,也可利用环境中振动和温差等通过能量俘获的方式为系统提供可持续的可再生能源。

1.3 分布式感知节点的运行机制与功能实现

图3显示了系统外部冲击事件下,一个传感输入通道上的事件响应与记录过程。为了捕捉整个波形并为无线节点感知数据提供参考,冲击事件由示波器同时记录。图3(a)是示波器在2Mpsps采样频率下记录的来自传感器的整流电压。

当整流电压大于阈值时,比较器的输出产生一个阶

跃信号,为后端微处理器的不同运行状态转换提供了一个触发信号源,如图3(b)所示。事件驱动的相应时间由比较器的响应时间来决定,而相应的快慢对事件捕捉能力和系统整体功耗都有很大影响。随后,触发信号的边沿变化将微控制器(MCU)唤醒,并立即调用模数转换器(ADC)开始记录PZT整流电压,如图3(c)~图3(d)所示。图3(e)为MCU记录的冲击相应数据。可以看到由于事件驱动方法的引入,该冲击时间相应的开始部分并没有记录到,但是足够快的响应时间仍能够满足冲击事件监测的需求。MCU数据采集完成并预处理后,将数据通过无线的形式发送到中央处理器,在收到主机的确认包后,无线模块被MCU关闭,MCU也进入低功耗模式,如图3(f)~图3(g)所示。

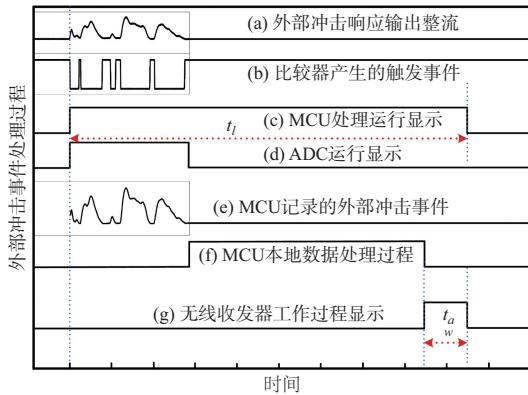


图3 分布式无线感知节点外部冲击事件处理机制

Fig.3 External impact processing mechanisms for wireless distributed sensor nodes

其中整流和事件触发的实现如图4所示。全桥整流电路将交流的PZT输出转换为MCU能够处理的直流信号,如图4(a)所示。通过比较器电路,整流后的输出电压与阈值电压比较,当输出电压高于阈值电压的瞬间,比较器输出一个信号阶跃变化,用于触发MCU,启动多通道数据采集与处理,如图4(b)所示。而参考电压的设定可由如图4(c)所示的分压电路来实现,其中, $V_{ref} = V_{cc} * R_2 / (R_1 + R_2)$, C_1 为稳压电容,用以减少 V_{ref} 的波动从而提供稳定的参考电压。分压电路还应用于整流模块之后,将整流输出电压调整为在MCU可采集范围之内。图4(d)~图4(e)显示了比较器触发事件在锯齿波信号输出下的产生结果以及比较器响应时间。

2 无线传感节点的功耗模型与冲击事件分析

2.1 无线传感节点的功耗理论模型

无线传感器节点持久自主运行的主要障碍之一是系统

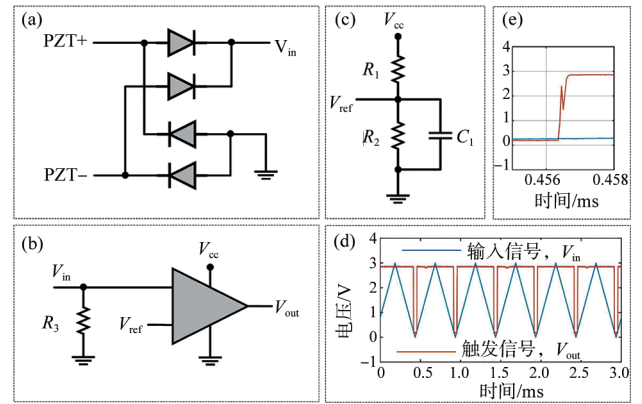


图4 传感器节点整流、调幅与事件触发实现方法

Fig.4 Implementation of rectification, amplitude adjustment and triggering event generation for sensor nodes

的能源供给。为了提高泛在感知无线传感器的自主可持续性,降低系统运行功耗和寻求可替代能源形式是两个主要的解决手段。为了准确描述系统的运行功耗,本部分建立了系统运行的功耗理论模型。系统在时间长度 τ 内不同运行模式下的整体功耗可以表达为

$$u(\tau) = P_1(t_w + t_l) + P_s(\tau - t_w - t_l) + P_a^w t_a^w + P_o^w(\tau - t_a^w) + P_{other} \tau \quad (1)$$

式中, P_1 和 P_s 为微处理器运行和低功耗模式下的功耗; t_w 和 t_l 为唤醒响应时间和运行时间; P_a^w 和 P_o^w 为无线通信模块在运行和低功耗模式下的功耗; t_a^w 为无线模块的运行时间; P_{other} 为系统其他部分平均功耗。根据系统连续随机变量方程理论,冲击事件的能耗概率密度函数可以表示为

$$f_u(u) = \frac{1}{P_1 + P_s + P_{other}} \hat{f}_{\tau_l}(\tau) \quad (2)$$

式中, $\hat{f}_{\tau_l}(\tau)$ 为冲击事件时间间隔的概率密度函数。因此,系统的平均功耗可以表达为

$$P_{av} = P_1 \cdot \alpha \cdot \int_0^\infty u f_u(u) du / \tau \quad (3)$$

式中, P_1 为触发事件发生的概率,其大小可由比较器阈值 V_{ref} 来决定; α 为冲击事件平均发生率。由以上可知,通过确定输入参数的统计学特性 (α , $\hat{f}_{\tau_l}(\tau)$ 和 P_1) 和运行参数 (V_{ref} , P_1 , P_s , t_w , t_l , P_a^w , P_o^w 和 P_{other}),便可优化系统平均功耗 P_{av} 和系统响应时间 t_w 等系统参数。

2.2 外部冲击事件定位与能量估计模型

冲击事件的位置定位通常由响应信号从冲击发生位置到达特定传感器的时间(ToA)来决定。通过多个通道ToA信号的差异,利用三角测量法便可定位出冲击发生的位置。具体计算方法为

$$E(x_p, y_p) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left[\frac{(v_i t_i - v_j t_j) - (\sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2} - \sqrt{(x_p - x_j)^2 + (y_p - y_j)^2})}{\sqrt{(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2}} \right]^2 \quad (4)$$

式中, N 为监测冲击事件 PZT 传感器数量; t_i 为第 i 个传感器的冲击到达时间; (x_p, y_p) 为冲击事件发生的位置; (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 为传感器的坐标。 $E(x_p, y_p)$ 描述了在不同位置上的传感距离方程, 当该值最接近零时, 即为预测的冲击位置。

跨介质飞机着水时, 机底与水面的接触冲击是一条线, 同样可以用到达时间来确定, 设接触线方程为 $Ax + By + C = 0$, 通过不同传感器的到达时间 t_i , 最小化传感器到冲击线的计算距离与实际距离之间的差异

$$(A, B, C) = \arg \min_{A, B, C} \sum_{i=1}^N (v t_i - \frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}})^2 \quad (5)$$

式(5)可以采用最小二乘法或其他优化算法求解出直线的相关参数 A, B, C 。冲击强度可以用冲量来评估, 其表达式为

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F dt \quad (6)$$

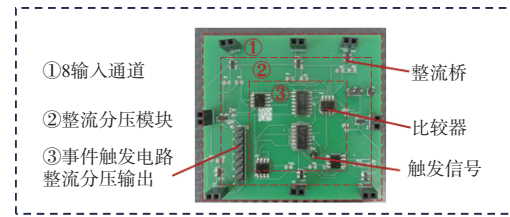
式中, F 为作用在机身表面的冲击力, t_1 和 t_2 分别为冲击开始和结束时间。试验中冲击事件可由力锤产生, 力锤上的传感器可以记录冲击力和持续时间, 以实现冲量的标定。通过冲量来量化冲击的强度, 可以构建包含冲击事件的冲量和传感器输出的数据集, 并用于深度学习的训练过程, 即可在实际的冲击事件监测中获取并分析冲击的强度。

3 无线传感系统硬件实现与测试

3.1 无线传感器节点硬件实现与测试平台

无线传感节点的硬件电路主要包括事件触发电路、微处理器和无线传输模块。事件触发电路包括桥式整流电路、分压电路、比较器阵列, 在一块尺寸为 $60\text{mm} \times 66\text{mm}$ 的印刷电路板(PCB)上实现, 如图 5(a) 所示。其含有 8 个 PZT 传感器输入通道。桥式整流器的引入是由于该 MCU 只接受正的输入电压。整流后的电压与比较器的阈值电压进行比较, 产生事件触发信号。

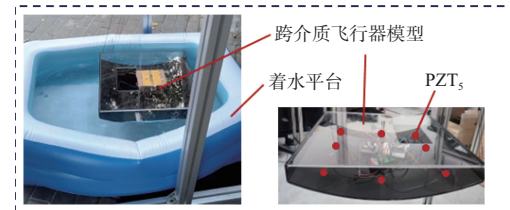
触发信号连接到 MCU, 以便在冲击发生时将其唤醒。整流的电压 V_i' 经过分压电路后也连接到 MCU 上的 8 个 ADC 通道。唤醒后, 该 MCU 记录所有的输入信号, 并从这些输入信号中提取选定的特征, 如 ToA。该 MCU 还与用于数据通信的无线传输模块(低功耗蓝牙模块)结合, 用以实现数据的收发。



(a) 无线传感节点硬件电路



(b) 飞行器机身冲击测试平台



(c) 跨介质飞行器着水模拟平台

图 5 无线传感器节点测试平台

Fig.5 Testing platform of the impact-detecting wireless sensor nodes

为验证系统低功耗特性, 在 3.3V 稳定供电下对无线传感节点硬件电路的各个有源模块进行了电流测量, 见表 1。无线传感节点在待机低功耗模式下的电流为 1.57mA, 唤醒后系统电流为 17.53mA。基于事件触发的低功耗设计使得系统在没有冲击时能够保持较低的能量损耗, 从而延长无线传感系统的运行时长。

表 1 无线传感器节点电路功耗

Table1 Power consumption of wireless sensor node circuit

模块	低功耗模式	唤醒状态
事件触发模块	1.46mA	1.81mA
本地处理模块	1.95μA	9.99mA
无线传输模块	0.11mA	5.73mA
系统整体	1.57mA	17.53mA

为验证无线传感系统的有效性, 设计了两种试验平台, 如图 5 所示。图 5(b) 是跨介质飞行器机身冲击测试平台, 用 $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times 3\text{mm}$ 的复合材料板模拟机体冲击, 复合材料板固定在中间镂空的框架上, 四周均匀布置 8 个 PZT 传感器。本文使用力锤量化冲击事件中力的大小, 通过在不同位置施加不同大小的冲击力, 以验证该系统对外部冲击定位和能量水平的评估能力。图 5(c) 是跨介质飞行器着

水模拟平台,使用截面尺寸为500mm×500mm曲面半径为650mm的曲面板模拟跨介质飞行器底部,内侧同样在四周均匀布置8个PZT₃。曲面板悬挂在架子上,下方设置水池,便于进行模拟飞行器着水试验。当跨介质飞行器接触水面时,系统自动响应,采集并分析冲击数据,并通过无线通信模块将处理后的数据发送至监控网络。

3.2 单通道不同冲量事件触发机制测试

冲击事件将在机身蒙皮中产生导波,并由PZT传感器记录。使用力锤在如图5(b)所示的测试平台进行冲击测试。图6记录了PZT传感器单通道信号的电压与时间的关系。使用力锤在0时引入外部冲击事件。图6(a)为示波器记录到的PZT传感器原始信号。图6(b)记录了整流后的信号。图6(c)记录了微处理器所记录外部冲击PZT传感器响应信号。从图6中可以看到,在冲击事件发生后经过0.1ms,微处理器启动工作,开始记录传感器信号,通过10ms的采集后,基本获取到冲击事件的基本响应信息,微处理器停止记录。该系统对外部冲击事件有快速响应与记录的能力。图6(c)中微处理器采集的信号基本与图6(b)所示的示波器信号一致,验证了无线传感系统对于外部冲击事件具有快速响应与精确记录的能力,可保障事件记录的精确性与有效性。

图7显示了在6种不同冲量、相同冲击位置情况下单一ADC通道采集信号的情况,以显示该冲击监测系统对不同能量冲击信号的监测性能。观察到的信号波形变化趋势基

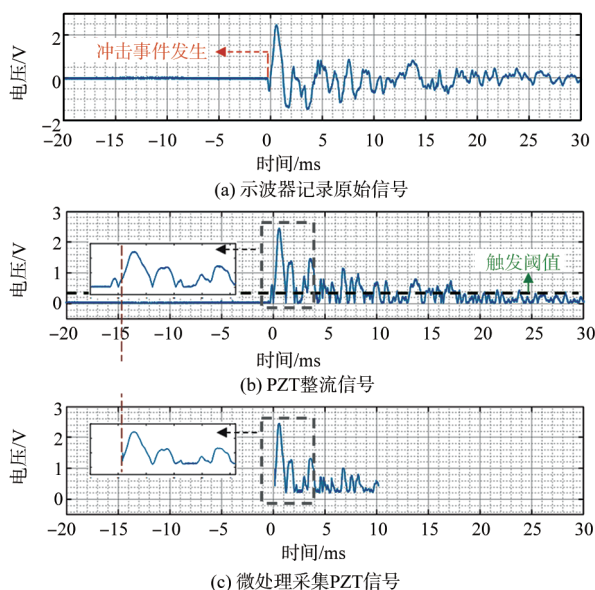


图6 无线传感节点单通道冲击事件监测

Fig.6 Impact event detection under operational noises from one sensing channel of the sensor node

本一致,幅值存在差异,随着冲量增加而变大,但对于较小冲量(8.1mN·s),由于幅值过小难以达到事件触发阈值,导致波形数据记录延后,信号的完整性受到了影响。

3.3 多通道外部冲击事件测试

为了验证系统多通道响应的能力,本文使用图5(b)的实验平台与多通道无线传感节点开展不同位置的冲击事件监测。图8展示无线传感器节点多通道外部冲击事件响应信号和定位结果。如图8(a)所示,撞击位置附近的通道信号振幅较大,且信号到达时间较早;远离撞击位置的传感器信号振幅较小且信号到达较晚。通过信号到达时间的差异与幅值的区别,可利用后处理的手段,对冲击事件的位置进行估计。

为了解决该问题,需要精准设计如图4(b)所示的分压电路。分压电路既需确保采集信号在ADC的动态范围内,避免信号截断,同时又要防止因过度分压导致信号强度过低,避免数据丢失。通过优化分压比和电路参数,能够平衡信号采集的完整性和ADC的输入范围,以实现高精度和高灵敏度的冲击监测。

根据式(4)提出的定位算法,多通道数据在上传至监控网络之前,可先一步在微处理器中进行处理,得到冲击的位置信息。对图5(b)所示的复合材料板进行均匀的108次冲击试验,根据公式 $e = \Delta d / d_1 \times 100\%$,算出预测误差,其中, Δd 为预测位置与实际冲击位置的偏差距离, d_1 为冲击试验中复合材料板的边长。在允许误差10%的范围内,预测准确率达到91.67%。图7(a)数据的预测结果如图8(b)所示,计算出预测冲击点与实际冲击点的误差为3.6%,基本实现冲击位置的预测。通过获取冲击波在不同传感器位置的到达时间,并计算复合材料板上所有点的传感器距离方程,可以判断出冲击发生在传感器1、2、8通道之间。

3.4 跨介质飞行器着水测试

在图5(c)所示的跨介质飞行器着水模拟平台上进行测试,模拟飞行器在不同工况下的着水过程,以评估无线传感系统在实际应用中的性能。图9展示了跨介质飞行器以不同位置着水时冲击的定位结果。飞行器接触水面的瞬间,会形成一条冲击线。根据式(5),可以计算出冲击接触线的方程,从而精确地描述冲击接触线的几何形态。

通过对不同姿态着水冲击数据的详细分析,可以判断出冲击事件的具体发生位置及其对飞行器结构的潜在影响。能够揭示着水对飞行器结构所施加的压力分布及其对机体的潜在影响,包括着水可能造成的结构损伤。对着水冲击的评估可为跨介质飞行器的结构安全隐患提供重要数据支持,还为未来跨介质飞行器的设计和优化提供了依据,

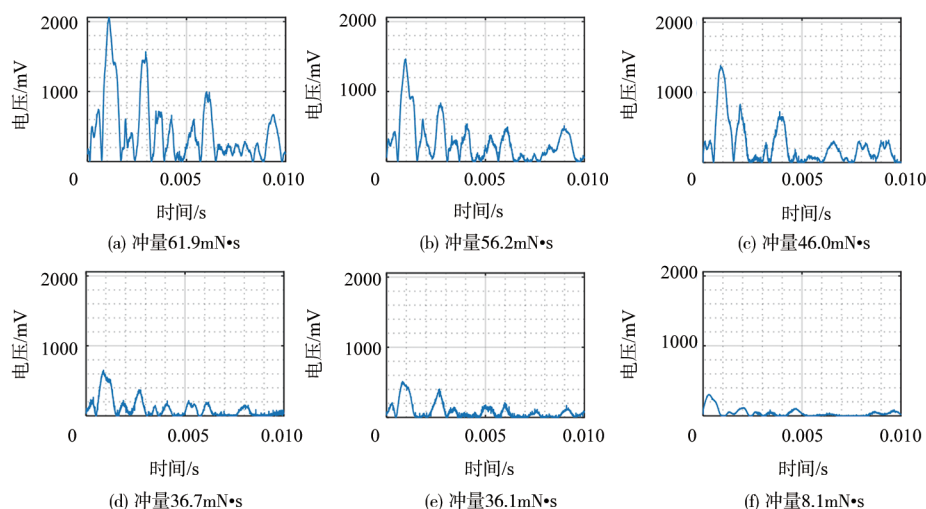


图7 不同冲量级别下外部冲击事件的传感系统输出结果

Fig.7 Sensing outputs of the wireless sensor nodes for impacts with different input impulse levels

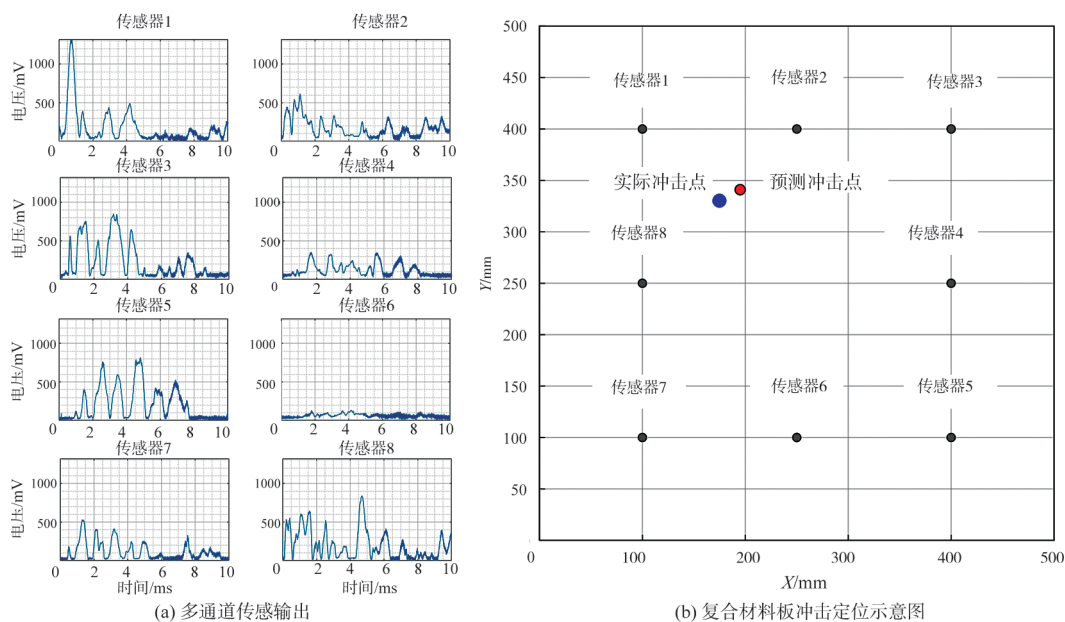


图8 无线传感器节点多通道外部冲击事件响应(冲击事件发生在通道1、2、8传感器所在位置中间部位)

Fig.8 Multi-channel impact-event detection results from the wireless sensor node (the impact was introduced in the middle of sensors connected to Ch 1,2,8 of the sensor node)

确保其在复杂环境下的可靠运行。

4 结论

跨介质飞行器由于其独特的工作特性,对外部冲击事件(如着水)的监测尤为关键,本文利用分布式压电传感器与低功耗无线传感技术结合,实现了跨介质飞行器关键结

构的分布式泛在感知。通过研究,得出以下结论:

(1) 分布式压电无线传感监测系统设计。系统集成成了整流、事件触发、本地处理和无线通信等模块。事件触发模块是在发生冲击时为本地处理模块生成触发(唤醒)信号设计的,唤醒响应时间达到0.1ms,使本地处理模块能够迅速响应冲击事件。本地处理模块实现8通道传感器冲击数据准确采

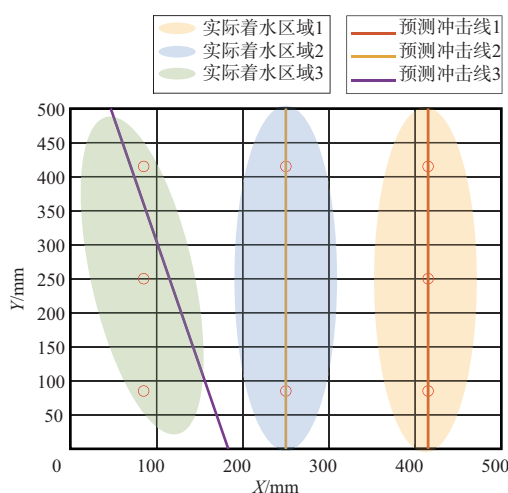


图9 无线传感器节点多通道着水事件响应

Fig.9 The Multi-channel water landing event detection results from the wireless sensor node

集。高响应精准采集确保系统及时捕捉并记录冲击事件。

(2) 基于事件触发机制的低功耗策略。系统采用了事件触发机制与中心调控机制的耦合方式,设计事件触发模块监测超过预定义阈值的冲击,在没有冲击发生时表现出低功耗状态。在3.3V稳定供电下,低功耗睡眠状态系统电流为1.57mA,唤醒状态电流为17.53mA。低功耗性能确保系统具备执行长时间监测任务的能力。

(3) 分布式压电无线传感系统外部冲击与着水事件监测。通过实验平台的测试,验证了系统在不同位置与强度的外部冲击事件下的监测和分析能力。该系统能够准确、及时地捕获多个传感输入通道(8个通道),并能够对不同位置的外部冲击事件做出准确的监测与分析。对复合材料板的冲击预测准确率91.67%。精确定位能力确保在实际应用中能够及时发现潜在的结构损伤或安全隐患。

综上所述,本文开发的系统为跨介质飞行器的外部冲击监测提供了一种高效、准确且低功耗的解决方案,为飞行器结构健康监测和安全性评估提供了重要支持。

AST

参考文献

[1] 孙泽鹏,宋乾福,贾重任. 跨介质飞行器的应用与技术特点分析[J]. 军民两用技术与产品, 2015(10): 22-23.

Sun Zepeng, Song Qianfu, Jia Chongren. Analysis of the application and technical characteristics of cross-medium aircraft[J]. Dual-Use Technologies and Products, 2015(10): 22-23. (in Chinese)

[2] 吕继航,杨仕福,杨荣,等. 水陆两栖飞机水动强度技术的现状与发展[J]. 航空制造技术, 2023, 66(6): 74-84.

Lyu Jihang, Yang Shifu, Yang Rong, et al. Review on strength technology of amphibious aircraft induced by hydrodynamics [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(6): 74-84. (in Chinese)

[3] Wang Lixin, Yin Haipeng, Yang Kun, et al. Water takeoff performance calculation method for amphibious aircraft based on digital virtual flight[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(12): 3082-3091.

[4] 孙丰,魏飞,吴彬,等. 大型水陆两栖飞机舱段入水冲击实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 39-43.

Sun Feng, Wei Fei, Wu Bin, et al. An experimental study on water impact of large amphibious aircrafts[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(12): 39-43. (in Chinese)

[5] 童明波,陈吉昌,李乐,等. 飞行器水载荷结构完整性数值模拟现状与展望-Part I: 水上迫降和水上漂浮[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 524530.

Tong Mingbo, Chen Jichang, Li Le, et al. State of the art and perspectives of numerical simulation of aircraft structural integrity from hydrodynamics-Part I: Ditching and floating[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 524530. (in Chinese)

[6] 黄领才,雍明培. 水陆两栖飞机的关键技术和产业应用前景[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 522708.

Huang Lingcai, Yong Mingpei. Key technologies and industrial application prospects of amphibian aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(1): 522708. (in Chinese)

[7] 何肇雄,郑震山,马东立,等. 国外跨介质飞行器发展历程及启示[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(5): 152-157.

He Zhaoxiong, Zheng Zhenshan, Ma Dongli, et al. Development of foreign trans-media aircraft and its enlightenment to China [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(5): 152-157. (in Chinese)

[8] Wei Jun, Sha Yongbai, Hu Xinyu, et al. Research on aerodynamic characteristics of trans-media vehicles entering and exiting the water in still water and wave environments[J]. Drones, 2023, 7(2): 69.

[9] Zhou Donghui, Shi Honghui, Jia Huixia. Characteristics of the multiphase flow field with super-cavitation induced by

- successively fired projectiles under-water and cross-medium[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(1): 247-258.
- [10] 褚林塘. 水上飞机水动力设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- Chu Lintang. Hydrodynamic design of seaplanes[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [11] Shi Yao, Pan Guang, Yan Guoxin, et al. Numerical study on the cavity characteristics and impact loads of AUV water entry[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 89(4): 44-58.
- [12] Shi Fulong, Xin Jianjian, Jin Qiu. A Cartesian grid based multiphase flow model for water impact of an arbitrary complex body[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 110(1): 132-147.
- [13] Huang Luofeng, Ren Kang, Li Minghao, et al. Fluid-structure interaction of a large ice sheet in waves[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 182(15): 102-111.
- [14] 吸明月, 姚辽军, 果立成, 等. 复合材料疲劳分层扩展数值仿真分析研究[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(10): 58-65.
- Chuo Mingyue, Yao Liaojun, Guo Licheng, et al. Numerical investigation on fatigue delamination growth in composite laminates[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(10): 58-65. (in Chinese)
- [15] Memmolo V, Maio L, Boffa N D, et al. Damage detection tomography based on guided waves in composite structures using a distributed sensor network[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(1): 11007.
- [16] Malik M K, Chronopoulos D, Tanner G. Transient ultrasonic guided wave simulation in layered composite structures using a hybrid wave and finite element scheme[J]. *Composite Structures*, 2020, 246: 112376.
- [17] Feng T, Bekas D, Aliabadi M H F. Active health monitoring of thick composite structures by embedded and surface-mounted piezo diagnostic layer[J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3410.
- [18] 安雨晴, 杨宇, 王莉. 一种基于广义回归神经网络的裂纹扩展定量监测模型[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(3): 40-48.
- An Yuqing, Yang Yu, Wang Li. A quantitative monitoring model for crack propagation based on generalized regression neural network[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(3): 40-48. (in Chinese)
- [19] Alom M Z, Taha T M, Yakopcic C, et al. The history began from alexnet: A comprehensive survey on deep learning approaches[EB/OL]. (2018-03-03). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.01164>.
- [20] Khan S, Yairi T. A review on the application of deep learning in system health management[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 107: 241-265.
- [21] Tabian I, Fu Hailing, Khodaei Z S. A convolutional neural network for impact detection and characterization of complex composite structures[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 4933.
- [22] Tang Xiaoli, Wang Xianghong, Cattley R, et al. Energy harvesting technologies for achieving self-powered wireless sensor networks in machine condition monitoring: A review[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4113.
- [23] Lynch J P, Loh K J. A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring[J]. *Shock and Vibration Digest*, 2006, 38(2): 91-128.
- [24] Wang Lei, Yuan F G. Energy harvesting by magnetostriuctive material (MsM) for powering wireless sensors in SHM[C]. *Proceedings of SPIE*, 2007: 6529.
- [25] Lu Chenyang, Saifullah A, Li B, et al. Real-time wireless sensor-actuator networks for industrial cyber-physical systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2016, 104(5): 1013-1024.
- [26] Khaitan S K, McCalley J D. Design techniques and applications of cyberphysical systems: A survey[J]. *IEEE Systems Journal*, 2014, 9(2): 350-365.
- [27] Fu Hailing, Sharif-Khodaei Z, Aliabadi M H F. An energy-efficient cyber-physical system for wireless on-board aircraft structural health monitoring[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 128: 352-368.
- [28] Fu Hailing, Sharif-Khodaei Z, Aliabadi M H F. An event-triggered energy-efficient wireless structural health monitoring system for impact detection in composite airframes[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 6(1): 1183-1192.
- [29] Gianni C, Balsi M, Esposito S, et al. Low-power global navigation satellite system-enabled wireless sensor network for acoustic emission localisation in aerospace components[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, 27(6): 2525.
- [30] Wu Jian, Yuan Shenfan, Zhou Genyuan, et al. Design and evaluation of a wireless sensor network based aircraft strength

- testing system[J]. *Sensors*, 2009, 9(6): 4195-4210.
- [31] Wilson W C, Atkinson G M. Passive wireless sensor applications for NASA's extreme aeronautical environments [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(11): 3745-3753.
- [32] Krichen D, Abdallah W, Boudriga N. On the design of an embedded wireless sensor network for aircraft vibration monitoring using efficient game theoretic based MAC protocol [J]. *Ad Hoc Networks*, 2017, 61: 1-15.
- [33] Liu Kunchang, Xiang Xin, Yin Liyan, et al. Automatic modulation recognition through wireless sensor networks in aeronautical wireless channel[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 23125-23132.

Distributed Wireless Piezoelectric Smart Ubiquitous Sensing Research for Trans-Media Aircraft

Liu Zhuowen^{1,2}, Fu Hailing^{1,2}, Feng Tianyi³, Huang Lingcai³, Deng Fang^{1,2}

1. *Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

2. *Beijing Institute of Technology, Zhuhai, Zhuhai 519088, China*

3. *AVIC General Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519040, China*

Abstract: The trans-media aircraft operate under harsh conditions while performing maritime and aerial missions, and real-time monitoring of their status is crucial to ensure safe and stable operation. This paper presents the design, development, and experimental evaluation of a low-power, high-response wireless distributed ubiquitous sensing system for external impact monitoring and evaluation of critical components of trans-media aircraft, such as landing-on-water. Due to the transient and random nature of impact events, the study combines an event-triggered mechanism with a network center requesting mechanism to exhibit low power consumption when no impact occurs and high performance when triggered. System responsiveness, robustness, and energy efficiency are considered and analyzed. Based on the system requirements and functions, the wireless sensor system is designed with modules including filtering, rectification, impact detection, local processing, and wireless communication. The system is implemented on a printed circuit board. The system is capable of accurately and timely capturing multiple piezoelectric sensing channels (8 channels). Using this ubiquitous sensing system, effective estimation of the location and energy level of external impact events can be achieved. The designed distributed piezoelectric wireless smart ubiquitous sensing system for trans-media aircraft can monitor impact events during operation, identify the location of the impacts, and promptly detect potential structural damage or safety hazards, ensuring the safe and stable operation of the aircraft. This low-latency, low-power, high-response distributed sensing system can be extended to other applications on the Internet of things for monitoring rare, random, and transient events.

Key Words: trans-media aircraft; PZT sensor; distributed ubiquitous sensing; wireless sensor network; structural health monitoring

Received: 2024-09-09; **Revised:** 2024-12-05; **Accepted:** 2025-02-11

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62473051, 62303053, 61933002); Aeronautical Science Foundation of China (20230009072004); Beijing Natural Science Foundation (L233003)