



汤怡静, 黄河清, 程颖慧, 高瑞芳, 汪莹, 刘海军, 魏霜, 向才玉. 声学传感技术在昆虫检测中的应用与前景展望 [J]. 环境昆虫学报, 2024, 46 (5): 1068 - 1075. TANG Yi-Jing, HUANG He-Qing, CHENG Ying-Hui, GAO Rui-Fang, WANG Ying, LIU Hai-Jun, WEI Shuang, XIANG Cai-Yu. The application and prospect of acoustic sensing technology in insect detection [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (5): 1068 - 1075.

声学传感技术在昆虫检测中的应用与前景展望

汤怡静¹, 黄河清¹, 程颖慧², 高瑞芳¹, 汪莹¹,
刘海军³, 魏霜³, 向才玉^{1*}

(1. 深圳海关动植物检验检疫技术中心, 深圳 518045; 2. 深圳市仙湖植物园, 深圳 518000; 3. 广州海关技术中心, 广州 510623)

摘要: 声学传感技术作为一种简单、实用且有效的技术手段, 广泛应用于农业 (作物、树木) 和食品安全 (谷物、鲜果、干果等) 相关领域, 在害虫检测、监测预警、生物学研究以及防控方面取得了显著进展, 并开发出了一些声测设备。本文综述了近年来几种应用于昆虫检测的声学传感技术, 包括碰撞声检测技术、压电传感器技术和超声波检测技术等, 并对其应用前景进行了探讨, 旨在为声学传感技术在昆虫检测领域的研究及应用提供参考。

关键词: 传感器; 昆虫; 声学技术; 研究进展

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2024) 05-1068-08

The application and prospect of acoustic sensing technology in insect detection

TANG Yi-Jing¹, HUANG He-Qing¹, CHENG Ying-Hui², GAO Rui-Fang¹, WANG Ying¹, LIU Hai-Jun³, WEI Shuang³, XIANG Cai-Yu^{1*} (1. Animal and Plant Inspection and Quarantine Technology Center of Shenzhen Customs District, Shenzhen 518045, China; 2. Shenzhen Fairy Lake Botanical Garden, Shenzhen 518000, China; 3. Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Acoustic sensing technology, as a simple, practical and effective technical means, has been widely used in agriculture (crops, trees) and food safety (grains, fresh fruits, dried fruits, etc.). Significant progress has been made in pest detection, monitoring and early warning, biological research, and prevention and control, and some acoustic measuring equipment has been developed. This paper delineates several contemporary acoustic sensing methodologies employed in insect detection, encompassing impact acoustic technology, piezoelectric sensor technology, and ultrasonic detection technology. Furthermore, we discuss their application prospects, aiming to provide reference for the research and application of acoustic sensing technology in the field of insect detection.

Key words: Sensor; insects; acoustic technology; research progress

昆虫取食对全球粮食安全构成了重大威胁, 尤其在全球人口快速增长的背景下, 这一问题愈加严重。预计到 2050 年, 全球人口将超过 91 亿, 粮食需求将大幅增加。然而, 据联合国粮农组织估计, 每年有多达 40% 的全球作物产量受虫害影响, 其中入侵昆虫造成的损失至少为 700 亿美元 (Secretariat

et al., 2021)。因此, 采取有效的措施控制虫害对于满足日益增长的粮食需求, 确保全球粮食安全具有重要意义。减少虫害损失可以通过高效的农业管理和储存技术来实现, 同时减少对广谱杀虫剂的依赖以避免益虫被杀灭, 并降低对人类和环境健康的风险 (Pecenka *et al.*, 2021)。有害生物综合防治

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2601500); 广东省科技计划项目 (2023A1111120029)

作者简介: 汤怡静, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: 15813385226@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 向才玉, 女, 正高级农艺师, 研究方向为植物检疫, E-mail: cyxiang2015@163.com

收稿日期 Received: 2024-07-15; 接受日期 Accepted: 2024-08-23

(Integrated pest management, IPM) 是一种采取多种策略来管理害虫的有效方法, 不仅能够显著提高作物产量和质量, 更有利于推动农业的可持续发展 (Bueno *et al.*, 2021; Sutanto *et al.*, 2023a; Tonle *et al.*, 2024)。精准检测和识别害虫是IPM成功实施的关键步骤之一, 通过先进的监测技术提高害虫管理的效率和准确性, 是确保农作物安全的重要保障 (Nugroho *et al.*, 2020; Deguine *et al.*, 2021)。

传感技术作为现代科技的重要组成部分, 被广泛应用于各个领域。它能够感知物理、化学或生物环境的变化, 并将这些变化转化为可测量的信号 (杨大丽, 2007; 段云龙等, 2015; Kumar *et al.*, 2020; 陈敏等, 2024; 邸志刚等, 2024)。在虫害管理方面, 声学传感技术具有悠久的历史, 通过将声学与传感器结合, 提供关于昆虫生活史、取食和运动的背景信息, 为害虫防治提供决策依据 (Neethirajan *et al.*, 2007; Mankin *et al.*, 2012; Stejskal *et al.*, 2019; Bhairavi *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2020; Koubaa *et al.*, 2020; Montgomery *et al.*, 2021)。随着传感器和信号记录系统成本的降低、信号处理速度和数据存储能力的大幅提高, 以及识别目标昆虫声音模式和区分背景噪音方法的快速发展, 声学传感技术在虫害管理中的应用不断增加, 并且随着全球贸易和外来入侵物种的扩散, 其重要性将继续提升 (Mankin *et al.*, 2011; Fei *et al.*, 2019; Mankin *et al.*, 2021)。本文综述了碰撞声检测技术、压电传感器技术和超声波检测技术等昆虫检测方面的应用, 为声学传感器在昆虫检测领域的研究提供参考。

1 传感技术概述

传感技术的基本原理是将环境中的物理量、化学量、生物量等转换成电信号或其它可测量形式, 以便进行监测、控制或数据采集。传感技术以其高灵敏度、精确度和可靠性著称, 能够快速响应多种物理量的变化, 并适应各种环境条件。传感器通常包括敏感元件和转换元件, 前者直接感知环境变化, 如温度、压力、光强度等, 后者将这些变化转换为可测量的电信号 (段云龙等, 2015)。例如, 压电传感器利用压电效应将压力转换为电信号 (Newnham *et al.*, 1980; Ju *et al.*, 2023), 光电传

感器利用光电效应将光信号转换为电信号 (向丽坤等, 2015; 刘昕宇等, 2023; 邱显坤等, 2024), 声学传感器则将声波和音频信号转换为电信号 (Mankin *et al.*, 2011)。随着科学技术的不断进步, 传感器的原理和技术持续改进和完善, 新型材料的应用提高了传感器的灵敏度和稳定性, 微纳技术的发展使传感器的尺寸不断减小, 功耗不断降低, 从而提升传感器的性能 (雷声, 2011)。传感器的小型化设计和低功耗特性也使其更易于集成到各类系统中 (张志强等, 2023)。为了更全面地感知环境并获取更多信息, 现代传感器技术往往采用多传感器融合技术, 通过组合不同类型的传感器, 实现对环境的多方位和多参数监测 (王耀南等, 2001; Zhuang *et al.*, 2023)。同时, 因具备自校准和智能处理功能, 传感器在工业、医疗、农业和消费电子等领域得到广泛应用。

传感技术的进步也推动了其在昆虫检测领域的应用研究。传感技术在昆虫检测中的应用主要体现在利用各种传感器进行高效、精准的监测。例如, 红外传感器和摄像技术可以探测并识别昆虫的活动和种类, 通过图像处理算法进一步分析昆虫的行为模式和种群分布 (王景旭, 2020; Rydhmer *et al.*, 2022; 梁勇等, 2023; Saha *et al.*, 2024)。声学传感器能够捕捉昆虫发出的特定频率声音, 该技术不仅可以识别昆虫的种类, 还可以监测其活动频率和数量变化, 为害虫爆发预警提供依据 (Mankin *et al.*, 2021; Sutanto *et al.*, 2023a)。化学传感器可以检测昆虫释放的气味或信息素, 通过分析化学信号判断植物受昆虫取食的情况 (Jaishi *et al.*, 2024)。机械传感器能够监测昆虫的活动, 记录其运动轨迹和活动区域, 为研究昆虫的生态习性提供数据支持 (Noskov *et al.*, 2021)。这些传感技术结合大数据和人工智能分析, 为农业害虫防控、生物多样性研究和生态环境监测提供了强有力的支持 (Mankin *et al.*, 2020a)。

2 声学传感技术与昆虫检测技术的结合

声检测传感器的工作原理主要基于声波的捕捉和转换。声波是一种机械波, 当声波传播时会引

起空气或其他介质中的粒子振动,声检测传感器将这些机械振动转换为电信号,以便进行测量和分析。近年来,声检测技术不断发展,尤其是微机电系统(Micro-electro-mechanical system, MEMS)技术和数字信号处理技术的进步,推动了声检测传感器的小型化、智能化和高性能化(魏慧芬等, 2022; 韩志飞等, 2023)。随着技术的进步,声检测传感器在昆虫检测中的应用迅速增加。声学传感器通过捕捉昆虫活动产生的声音或振动来识别其存在,或是通过声学传感器获得的声音信号分析昆虫寄主状态,实现对虫害的检测或监测(Liu *et al.*, 2017; Khudri *et al.*, 2021)。常见的昆虫声检测技术包括碰撞声检测技术、压电传感器技术以及超声波检测技术等。

2.1 碰撞声检测技术

碰撞声检测技术(Impact acoustic, IA)作为一种潜在的昆虫检测方法,具有非接触、高效和快速等优点。IA技术利用麦克风捕捉冲击过程中产生的声音信号,通过分析声音信号的频谱和幅值特征,可以反映样品性质和状态,如颗粒的形状、大小和硬度。IA技术所需的设备主要包括振动给料器、冲击板、麦克风、数据采集系统和数据处理软件等。振动给料器用于将样品以单一排列的方式送入冲击板,冲击板接收样品的冲击并产生声音信号,麦克风负责捕捉和记录声音信号,数据采集系统用于实时采集和存储声音数据,数据处理软件则用于对采集到的数据进行特征提取和分类分析(Pearson *et al.*, 2001; Pearson *et al.*, 2007)。

IA技术最早由Pearson等(2001)开发,用于分离开壳开心果和闭壳开心果。随后,IA技术在昆虫检测方面的应用受到了广泛关注。Pearson等(2007)的研究表明,IA信号可以用于检测小麦颗粒中的虫害程度。利用两个麦克风捕捉小麦颗粒对钢板的冲击声,通过神经网络分类分析频率和谱幅特征,87%的虫害损坏小麦颗粒可被正确分类。Bucrano等(2012)对麦克风系统进行了优化,他们使用3种类型的麦克风(AKG ck 91、Neumann km 184 和 Shure beta 58A)对稻谷进行分类测试,试验结果表明麦克风与样品撞击点的距离、样品的落差高度和冲击板的材质是试验的关键因素,麦克风类型对试验结果没有显著影响,3种麦克风识别虫害稻谷的准确率分别达到93.3%、91.1%和88.9%。Guo等

(2016)提出了一种基于集成经验模态分解(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)的IA技术新方法,用于检测昆虫损坏的小麦粒。EEMD能够有效处理非平稳信号并抑制模式混叠现象,因而适用于分析碰撞声信号。该研究利用EEMD分解碰撞声信号以提取关键特征,能够准确识别93.3%的昆虫损害小麦粒。Sun等(2018)进一步用EEMD检测玉米粒的虫害损伤和霉变情况,并提出了多域集成方法来处理碰撞声发射信号,使用粒子群优化支持向量机(Support vector machine, SVM)以克服传统SVM方法的缺陷并找到最佳参数,该方法对虫害损坏籽粒的识别准确率达到99.6%。Guo等(2019)基于高斯建模和改进极限学习机方法的IA技术检测虫害小麦籽粒,其分类准确率可达96.0%。

碰撞声检测技术作为一种非侵入式的方法在昆虫检测应用中具有广阔的前景。然而,麦克风在检测土壤、木材或其他固体基材中昆虫产生的信号方面存在局限,而基于压电传感器的传感技术在这些检测中表现更佳(Mankin *et al.*, 2011)。

2.2 压电传感器技术

压电传感器技术的原理核心是压电传感器,其以高灵敏度和低噪音特性著称(王天资等, 2023),适用于检测微弱的生物声学信号。压电传感器的核心由压电晶体组成,当受到压缩或拉动时,压电晶体会在其相对表面上形成交变电荷,产生可测量的电流(Janshoff *et al.*, 2007; Lobada *et al.*, 2022)。昆虫在活动 and 进食时会产生微小的机械振动,压电传感器能够捕捉这些振动并将其转化为电信号,这些信号可以通过放大和滤波技术进行处理,实现对昆虫活动的检测和分析。

在检测仓储害虫方面,Eliopoulos等(2015)使用压电传感器检测谷物中甲虫成虫为害情况,通过压电传感器和声发射放大器记录不同种群密度的甲虫活动,并使用希尔伯特(Hilbert)变换和噪声估计减法进行脉冲检测,该技术在检测每公斤硬质小麦中1或2头成虫时的准确率为72%~100%。Njoroge等(2017)利用压电传感器检测密闭储存条件对米象*Sitophilus oryzae*防控效果,发现氧气水平下降会导致昆虫活动减少,氧气水平低于5%时达到检测阈值,氧气水平降至2%时昆虫死亡。Njoroge等(2019)将四纹豆象*Callosobruchus maculatus*和米

象暴露在 1%、3%和 5%的氧气环境中 14 d, 试验结果表明, 低氧处理 4 d后, 昆虫的活动受到极大限制, 14 d后无昆虫存活且粮食无损害。压电传感器能够估算昆虫活动减少至可忽略水平所需的时间, 对于防控仓储害虫具有重要意义。

在检测蛀木害虫方面, 压电传感器技术也展现出巨大的潜力。Vinatier等(2013)利用压电传感器检测香蕉植株中的香蕉象甲*Cosmopolites sordidus*, 试验结果表明香蕉象甲幼虫活动信号的频率范围在 1.4~2.6 kHz之间, 脉冲持续约 168 ms, 间隔 300 ms, 该技术在受控条件下能够检测到超过 90%的受害香蕉植株。Hetzroni等(2016)将压电传感器插入棕榈纤维组织中, 可成功检测到红棕象甲*Rhynchophorus ferrugineus*幼虫和成虫的活动信号, 检测灵敏度在 75%~95%之间。但在红棕象甲为害早期由于其幼虫活动频率较低, 检测灵敏度仅为 33%~39%。Rigakis等(2021)开发了用于监测树木钻蛀类害虫的系统TreeVibes, 其原理是将金属棒插入木材内部, 通过与其连接的压电传感器进行寄主内部振动声波采集, 再通过深度学习区别虫声脉冲与干扰声脉冲, 该系统实现了对桑树上桑脊虎天牛*Xylotrechus chinensis*幼虫的监测。由于该系统携带无线传输模块, 可实现自动远程监测, 但也存在成本较高和易受外界干扰振动影响等问题。该系统已用于评估不同处理方法对自然条件下棕榈树中红棕象甲的防治效果(Sutanto *et al.*, 2023a; 2023b)。

压电传感器技术也被应用于水果害虫检测。Ekramirad等(2020)使用压电传感器对苹果内部为害的苹果蠹蛾*Cydia pomonella*进行无损检测, 试验结果表明压电传感器能精准采集苹果蠹蛾幼虫在寄主内部活动或取食的声信号, 其幼虫的取食频率为每秒 1~2.3 次。

压电传感器技术因其灵敏度高、便捷和耐用的特点, 在储粮害虫、蛀木害虫和水果害虫检测方面显示出极大的应用前景。然而, 为了实现可靠的检测, 必须牢固地附着、夹紧或插入植物组织中, 这一过程在实际应用中往往很难实现且有时会对植物造成损伤。此外, 昆虫产生的声学信号有时会受到背景噪声的干扰, 导致信号识别困难。

2.3 超声波检测技术

超声波检测是林木害虫监测中的一种有效手段, 能够在早期发现虫害并评估木材的健康状态。

超声波检测技术在昆虫检测应用中主要基于 3 个原理, 一是声波传播速度, 当超声波通过木材时, 其传播速度会受到木材密度和弹性的影响。虫害会在木材中形成空洞或腐烂区域, 这些区域的密度和弹性与健康木材不同, 从而改变超声波的传播速度。二是声波衰减, 超声波在传播过程中会因吸收和散射而衰减。虫害造成的空洞或腐烂区域会导致超声波的衰减特性发生变化, 通过分析声波衰减, 可以识别出木材中的异常区域。三是飞行时间(Time of flight, TOF), 超声波从发射到接收所需的时间可以反映其在木材中传播的距离和路径上的障碍。虫害造成的空洞或缺陷会影响声波的飞行时间, 导致检测到异常的飞行时间数据(Kim *et al.*, 2008; Oh and Lee, 2014; Urairi *et al.*, 2022)。

早期的超声波检测技术主要是基于声波传播速度的原理。Shade等(1990)以四纹豆象为模型, 通过监测 40 kHz的超声波信号来检测其取食活动。研究表明, 超声波检测技术能够监测四纹豆象所有龄期幼虫的取食过程, 且进食频率与每颗种子中的幼虫数量成正比。Kim等(2008)研究了TOF超声波检测木材害虫的方法, 将超声波换能器安装在刺槐木样本两端以产生和接收超声信号。CT图像显示, 直径大于 13 mm的孔洞可以被TOF超声波检测。然而, Oh和Lee(2014)指出该系统在检测木材早期虫害时存在局限性, 因虫害直径通常小于 5 mm, 无法被该系统检测, 并提出通过分析超声波频谱衰减(Ultrasonic spectrum attenuation analysis)来检测木材中的虫害。使用两个超声换能器生成和接收超声波, 并选用LabVIEW软件进行超声波频谱衰减分析, 通过分析 80 kHz的中心波, 在赤松木样本上检测到直径为 3 mm的孔洞, 表明超声波频谱衰减分析在检测能力上优于TOF技术。该研究表明, 超声波设备的检测能力由频率决定, 超声波频率越高, 可以检测到的缺陷越小。

与传统技术相比, 超声波检测昆虫活动时受背景噪声干扰较小, 可以更深入了解昆虫在寄主中的生活史, 能够在早期发现虫害并评估木材健康状况。然而, 高频超声波虽然灵敏度高, 但穿透深度有限, 其在穿过木材过程中会衰减。此外, 超声波换能器需要连接到木材样品两端进行检测, 无法做到无接触测量。

2.4 其他声学传感技术

近年来,随着传感器技术研究的发展,研究人员尝试使用不同类型的声学传感器对害虫的声信号进行采集,如驻极体传声器、光纤分布式声学传感器、MEMS麦克风等(Banlawe *et al.*, 2020; Banga *et al.*, 2020; Mankin *et al.*, 2020b)。驻极体传声器用事先已注入电荷而被极化的驻极体代替极化电源,具备成本低、体积小等优点,可将声波信号转化为电信号。Mankin等(2020b)开发了一种便携式采后昆虫检测系统(Postharvest insect detection system, PDS),将包装后的粮食产品放到有机玻璃基座上,通过嵌入有机玻璃基座上的驻极体传声器收集声音信号,存储后进行数字信号分析,监测该产品受害虫侵染的情况。通过该系统可以检测到米象和赤拟谷盗 *Tribolium castaneum* 在运动和取食时产生的单个声脉冲持续时间为 2~3 ms,声信号峰值在 0.5~2.5 kHz 之间。在试验室环境中利用该系统可在包装小麦中检测到侵染密度为 1.9 头成虫/kg 的米象和侵染密度为 3.8 头成虫/kg 的赤拟谷盗声信号。Banga等(2020)使用驻极体电容传声器在鹰嘴豆和绿豆中采集绿豆象 *Callosobruchus chinensis* 和四纹豆象的运动和取食声信号,实现了害虫密度评估。Ashry等(2020)在试验室中使用光纤分布式声学传感器对红棕象甲开展早期侵染监测,通过缠绕在棕榈树树干上的光纤,成功收集到 12 d 龄红棕象甲幼虫在封闭房间中取食的声信号,对于野外棕榈树的监测还需要进一步克服风、雨等恶劣环境产生的噪声对光纤的影响。Banlawe等(2020)使用 MEMS 麦克风采集放置于隔音箱中的芒果果肉象甲 *Sternochetus frigidus* 的活动声信号,并与驻极体传声器和压电传感器的采集效果进行比较,结果显示 MEMS 麦克风和压电传感器在低频下采集的虫声强度更高,在高频下 MEMS 麦克风采集效果更好,且 MEMS 麦克风对噪声的抗干扰能力更强。Hermosilla等(2021)利用麦克风捕捉葡萄花翅小卷蛾 *Lobesia botrana* 飞行时翅膀振动发出的声音,开发了一种实时检测葡萄花翅小卷蛾的无线传感器系统。当该系统检测到葡萄花翅小卷蛾,随即将时间、传感器所在位置以及检测数量的信息发送到服务器,该服务器可实时汇总检测统计数据。该系统在试验室和田间环境中均能成功检测葡萄花翅小卷蛾。

3 声学传感技术在昆虫检测方面应用前景展望

昆虫声检测技术通过传感器捕捉和分析昆虫活动产生的声波信号,为早期发现和有效控制害虫提供了一种创新的解决方案(Hussein *et al.*, 2010; Mankin *et al.*, 2018; Koubaa *et al.*, 2020; Ashry *et al.*, 2020)。该技术在解决隐蔽性害虫难以发现、采集声音信号的复杂性和多样性、以及环境噪声干扰等问题上,展示了巨大的应用前景和发展潜力。多种害虫,包括储粮害虫、林木害虫和水果害虫,常常藏匿于粮堆、树木或果实内部。传统检测方法,如放置培养法耗时较长,剖果、破木等方法对微小虫孔或者没有虫孔的害虫针对性不强,效率低下(Banga *et al.*, 2018)。通过声检测传感技术捕捉害虫活动产生的声波信号,可以实现非破坏性、实时的监测(Jalinas *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2020; Hermosilla *et al.*, 2021)。例如压电传感器技术能够捕捉害虫活动的微弱声音或振动(Njoroge *et al.*, 2017),特别是在害虫密度较低的早期阶段,可实现有效检测;超声波检测技术由于其强穿透能力,能够深入粮谷颗粒、树木或果实内部,检测深层的害虫活动。实际环境中采集到的昆虫活动声信号复杂多样,涉及频率、强度和时域特征等多个维度。不同种类的昆虫和昆虫不同的活动状态产生的声音各不相同(Jalinas *et al.*, 2019)。此外,环境噪声如风声、雨声和人为活动声等,也对昆虫声检测构成重要干扰,可能覆盖或混淆害虫的活动声信号,影响检测的准确性和可靠性。这些问题都对声传感技术提出了更高的要求。

声学传感技术的工作组件主要包括声信号捕获和信号转换处理两个部分。未来优化声检测传感器在昆虫检测中的应用,可从以下两方面着手:一是改进声学传感设备。采用灵敏度更高、穿透力更强的传感器设备,或将多种传感器结合使用,如将麦克风、压电传感器和超声换能器集成在一个系统中,充分利用各自的优势,采集高频率、高分辨率的声学数据,形成综合监测网络,提高检测的覆盖范围和精度。另一方面,优化声信号数据处理方式。在信号预处理时,利用滤波技术和噪声消除算法,有效过滤环境噪声和不相关的频率成分,提取害虫

活动的有效信号，确保数据的纯净度。在特征提取环节，提取多域特征，包括时域特征、频域特征等，以应对声信号的复杂性和不规则性。在特征选择和降维上，使用统计方法或机器学习方法选择最有代表性的特征，减少冗余。应用主成分分析、线性判别分析等方法降维，减少特征数量，提高计算效率。在模型的选择和优化上，根据问题性质选择合适的模型，如支持向量机 (Pisner *et al.*, 2020; Prasad *et al.*, 2023)、人工神经网络 (Artificial neural network, ANN) (Laxman *et al.*, 2023)、卷积神经网络 (Convolutional neural networks, CNN) 等 (Kiskin *et al.*, 2020; Lyu *et al.*, 2021; Mankin *et al.*, 2021; Bhangale *et al.*, 2023)，使用贝叶斯优化等方法调整模型参数，提高模型性能。利用机器学习和人工智能技术，分析复杂的声波信号，实现害虫活动声波特征的智能识别和分类 (Faiß and Stowell, 2023; Branding *et al.*, 2024)。此外，研发更低成本、便携化的传感器设备，提高其使用普及率，提高整体防控水平也是未来传感技术在害虫防控上的重要研发方向。

声学传感技术在昆虫检测方面展示出巨大的应用潜力和发展前景，随着技术的不断进步和应用的推广，昆虫声检测将为农业、林业和储粮等领域的害虫防治提供更加精准和高效的解决方案。

参考文献 (References)

- Ashry I, Mao Y, Al-Fehaid Y, *et al.* Early detection of red palm weevil using distributed optical sensor [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1): 3155-3162.
- Banga KS, Kotwaliwale N, Mohapatra D, *et al.* Techniques for insect detection in stored food grains: an overview [J]. *Food Control*, 2018, 94: 167-176.
- Banga KS, Mohapatra D, Babu VB, *et al.* Assessment of bruchids density through bioacoustic detection and artificial neural network (ANN) in bulk stored chickpea and green gram [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2020, 88: 101667-101679.
- Banlawe IAP, Cruz JCD. Acoustic Sensors for Mango Pulp Weevil (*Stretococcus frigidus* sp.) Detection [C]. 2020 IEEE 10th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET). IEEE, 2020: 191-195.
- Bhairavi KS, Bhattacharyya B, Manpoong NS, *et al.* Recent advances in exploration of acoustic pest management: A review [J]. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 2020, 8 (3): 2056-2061.
- Bhangale K, Kothandaraman M. Speech emotion recognition based on multiple acoustic features and deep convolutional neural network [J]. *Electronics*, 2023, 12 (4): 839-857.
- Branding J, Hörsten D, Böckmann E, *et al.* InsectSound1000 An insect sound data set for deep learning based acoustic insect recognition [J]. *Scientific Data*, 2024, 11 (1): 475-492.
- Brattoli M, De Gennaro G, De Pinto V, *et al.* Odour detection methods: Olfactometry and chemical sensors [J]. *Sensors*, 2011, 11: 5290-5322.
- Bueno AF, Panizzi AR, Hunt TE, *et al.* Challenges for adoption of integrated pest management (IPM): The soybean example [J]. *Neotropical Entomology*, 2021, 50: 5-20.
- Buerano J, Zalameda J, Ruiz RS. Microphone system optimization for free fall impact acoustic method in detection of rice kernel damage [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 85: 140-148.
- Chen M, Liao GP, Su ZH. Application of sensing and detecting technology of chlorophyll content in rape horn fruit in agricultural informatization [J]. *Journal of Smart Agriculture*, 2024, 4 (8): 21-24. [陈敏, 廖桂平, 苏招红. 油菜角果叶绿素含量传感检测技术在农业信息化中的应用研究 [J]. 智慧农业导刊, 2024, 4 (8): 21-24]
- Deguine JP, Aubertot JN, Flor RJ, *et al.* Integrated pest management: Good intentions, hard realities. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2021, 41 (3): 38-72.
- Devereau AD, Gudrups I, Appleby JH, *et al.* Automatic, rapid screening of seed resistance in cowpea *Vigna unguiculata* (L.) Walpers to the seed beetle *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera: Bruchidae) using acoustic monitoring [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2003, 39 (1): 117-129.
- Di ZG, Sun SS, Jia CR, *et al.* Research progress of fiber optic sensing technology in humidity detection [J]. *Laser Journal*, 2024: 1-10. [邸志刚, 孙硕升, 贾春荣, 等. 光纤传感技术在湿度检测中的研究进展 [J]. 激光杂志, 2024: 1-10]
- Duan YL, Li B, Li L, *et al.* Research progress and development trend of sensors [C]. Proceedings of 2nd Forum on Science and Technology Development for Sugars Industry, 2015, 1: 186-192. [段云龙, 李冰, 李琳, 等. 传感器的研究进展及发展趋势 [C]. 第二届糖业科技与发展高峰论坛论文集, 2015, 1: 186-192]
- Ekrmirad N, Parrish CA, Villanueva RT, *et al.* Low Frequency Signal Patterns for Codling Moth Larvae Activity in Apples [C]. 2020 ASABE Annual International Virtual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2020, 1: 2001028-2001038.
- Eliopoulos PA, Potamitis I, Kontodimas DC, *et al.* Detection of adult beetles inside the stored wheat mass based on their acoustic emissions [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2015, 108 (6): 2808-2814.
- Faiß M, Stowell D. Adaptive representations of sound for automatic insect recognition [J]. *PLoS Computational Biology*, 2023, 19 (10): 1011541-1011576.
- Fei S, Morin RS, Oswald CM, *et al.* Biomass losses resulting from insect and disease invasions in US forests [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116 (35): 17371-17376.
- Guo M, Ma Y, Yang X, *et al.* Detection of damaged wheat kernels using an impact acoustic signal processing technique based on Gaussian modelling and an improved extreme learning machine algorithm [J]. *Biosystems Engineering*, 2019, 184: 37-44.
- Guo M, Ma Y, Zhao Z, *et al.* A new EEMD-based scheme for detection of insect damaged wheat kernels using impact acoustics [J]. *Acta Acustica United with Acustica*, 2016, 102 (6): 1108-1117.
- Han ZF, Hu J, Li LN, *et al.* Progress of micro electric field sensing technology for new power system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43 (1): 399-415. [韩志飞, 胡军, 李立涅, 等. 面向新型电力系统的微型电场传感技术 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (1): 399-415]
- Hermosilla G, Pizarro F, Fingerhuth S, *et al.* Real-time remote sensing of the *Lobesia botrana* moth using a wireless acoustic detection sensor [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11 (24): 11889-11902.
- Hetzroni A, Soroker V, Cohen Y. Toward practical acoustic red palm weevil detection [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 124: 100-106.
- Hussein WB, Hussein MA, Becker T. Detection of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* using its bioacoustics features [J]. *Bioacoustics*, 2010, 19 (3): 177-194.
- Jaishi L, Ding W, Xian XJ. Detecting insect herbivore attacks using Metal-Organic Framework (MOF)-based colorimetric-piezoelectric sensor [C]. Proceedings of the 4th International Electronic Conference on Biosensors, 2024, 1:20-22.

- Jalinas J, Güerri-Agulló B, Dosunmu OG, *et al.* Acoustic activity cycles of *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Dryophthoridae) early instars after *Beauveria bassiana* (Hypocreales: Clavicipitaceae) treatments [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 2017, 110 (6): 551-557.
- Jalinas J, Güerri-Agulló B, Dosunmu OG, *et al.* Acoustic signal applications in detection and management of *Rhynchophorus* sp. in fruit-crops and ornamental palms [J]. *Florida Entomologist*, 2019, 102 (3): 475-479.
- Janshoff A, Steinem C. Piezoelectric Sensors [M]. Berlin: Springer Science and Business Media, 2007.
- Ju M, Dou Z, Li JW, *et al.* Piezoelectric materials and sensors for structural health monitoring: Fundamental aspects, current status, and future perspectives [J]. *Sensors*, 2023, 23 (1): 543-563.
- Khudri NAFRS, Mohd Masri MM, Maidin MST, *et al.* Preliminary evaluation of acoustic sensors for early detection of red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* incidence on oil palm and coconut in Malaysia [J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 2021, 41 (4): 3287-3292.
- Kim KM, Lee JJ, Lee SJ, *et al.* Improvement of wood CT images by consideration of the skewing of ultrasound caused by growth ring angle [J]. *Wood and Fiber Science*, 2008, 40 (4): 572-579.
- Kiskin I, Zilli D, Li Y, *et al.* Bioacoustic detection with wavelet-conditioned convolutional neural networks [J]. *Neural Computing and Applications*, 2020, 32: 915-927.
- Kogan M, Hilton RJ. Conceptual framework for integrated pest management (IPM) of tree-fruit pests [J]. *Biorational Tree-fruit Pest Management*, 2009, 1 (31): 1-31.
- Koubaa A, Aldawood A, Saeed B, *et al.* Smart palm: An IoT framework for red palm weevil early detection [J]. *Agronomy*, 2020, 10 (7): 987-1008.
- Kumar S, Mohapatra D, Kotwaliwale N, *et al.* Efficacy of sensor assisted vacuum hermetic storage against chemical fumigated wheat [J]. *Journal of Stored Products Research*, 2020, 88: 101640-101648.
- Laxman KC, Ross A, Ai L, *et al.* Determination of vehicle loads on bridges by acoustic emission and an improved ensemble artificial neural network [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 364: 129844-129858.
- Lei S. Study of Humidity Sensor Based on Surface Acoustic Wave and Micronano Technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. [雷声. 基于声表面波及微纳技术的高性能湿敏传感器研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012]
- Liang Y, Zhao J, Lin YZ, *et al.* Design of real-time monitoring device for fly pests based on infrared sensor [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48 (4): 230-234. [梁勇, 赵健, 林营志, 等. 基于红外传感器的实蝇类害虫实时监测装置的设计 [J]. *江苏农业科学*, 2020, 48 (4): 230-234]
- Lima MCF, Leandro MEDDA, Valero C, *et al.* Automatic detection and monitoring of insect pests: a review [J]. *Agriculture*, 2020, 10 (5): 161-186.
- Liu H, Lee SH, Chahl JS. A review of recent sensing technologies to detect invertebrates on crops [J]. *Precision Agriculture*, 2017, 18: 635-666.
- Loboda V, Sheveleva A, Komarov O, *et al.* An interface crack with mixed electrical conditions at its faces in 1D quasicrystal with piezoelectric effect [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29 (23): 3334-3344.
- Lyu Q, Guo M, Ma M, *et al.* DeCapsGAN: Generative adversarial capsule network for image denoising [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2021, 30 (3): 033016-033016.
- Mankin R, Hagstrum D, Guo M, *et al.* Automated applications of acoustics for stored product insect detection, monitoring, and management [J]. *Insects*, 2021, 12 (3): 259-281.
- Mankin RW, Hagstrum DW, Smith MT, *et al.* Perspective and promise: A century of insect acoustic detection and monitoring [J]. *American Entomologist*, 2011, 57 (1): 30-44.
- Mankin RW, Jetter E, Rohde B, *et al.* Performance of a low-cost acoustic insect detector system with *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) in stored grain and *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) in flour [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2020b, 113 (6): 3004-3010.
- Mankin RW, Patel R, Grugnale M, *et al.* Effects of *Diaphorina citri* population density on daily timing of vibrational communication calls: Potential benefits in finding forage [J]. *Insects*, 2020a, 11 (3): 182-194.
- Mankin RW, Stanaland D, Haseeb M, *et al.* Assessment of Plant Structural Characteristics, Health, and Ecology using Bioacoustic Tools [C]. Proceedings of Meetings on Acoustics AIP Publishing, 2018, 33 (1): 1-12.
- Mankin RW. Applications of acoustics in insect pest management [J]. *CAB International Reviews*, 2012, 7 (1): 1-7.
- Montgomery GA, Belitz MW, Guralnick RP, *et al.* Standards and best practices for monitoring and benchmarking insects [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2021, 8: 579193-579211.
- Neethirajan S, Karunakaran C, Jayas DS, *et al.* Detection techniques for stored-product insects in grain [J]. *Food Control*, 2007, 18 (2): 157-162.
- Newnham RE, Bowen LJ, Klicker KA, *et al.* Composite piezoelectric transducers [J]. *Materials and Design*, 1980, 2 (2): 93-106.
- Njoroge AW, Mankin RW, Smith B, *et al.* Effects of hypoxia on acoustic activity of two stored-product pests, adult emergence, and grain quality [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112 (4): 1989-1996.
- Njoroge AW, Mankin RW, Smith BW, *et al.* Effects of hermetic storage on adult *Sitophilus oryzae* L. (Coleoptera: Curculionidae) acoustic activity patterns and mortality [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2017, 110 (6): 2707-2715.
- Noskov A, Bendix J, Friess N. A review of insect monitoring approaches with special reference to radar techniques [J]. *Sensors*, 2021, 21 (4): 1474-1496.
- Nugroho AP, Purba S, Pratomo YB, *et al.* Development of Cloud-based Bioacoustics Monitoring System for Supporting Integrated Pest Management in Agriculture Production [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 449 (1): 012032-012040.
- Oh JK, Lee JJ. Feasibility of ultrasonic spectral analysis for detecting insect damage in wooden cultural heritage [J]. *Journal of Wood Science*, 2014, 60: 21-29.
- Pearson TC, Cetin AE, Tewfik AH, *et al.* Feasibility of impact-acoustic emissions for detection of damaged wheat kernels [J]. *Digital Signal Processing*, 2007, 17 (3): 617-633.
- Pearson TC. Detection of pistachio nuts with closed shells using impact acoustics [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2001, 17 (2): 249-253.
- Pecenka JR, Ingwell LL, Foster RE, *et al.* IPM reduces insecticide applications by 95% while maintaining or enhancing crop yields through wild pollinator conservation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118 (44): 2108429118.
- Pisner DA, Schnyer DM. Support Vector Machine [M]. New York: Machine Learning. Academic Press, 2020, 1: 101-121.
- Prasad R, Hussain MA, Sridharan K, *et al.* Support vector machine and neural network for enhanced classification algorithm in ecological data [J]. *Measurement: Sensors*, 2023, 27: 100780-100785.
- Rigakis I, Potamitis I, Tatlas NA, *et al.* TreeVibes: Modern tools for global monitoring of trees for borers [J]. *Smart Cities*, 2021, 4 (1): 271-285.
- Rydhmer K, Bick E, Still L, *et al.* Automating insect monitoring using unsupervised near-infrared sensors [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 2603-2614.
- Saha T, Genoud AP, Park JH, *et al.* Temperature dependency of insect's wingbeat frequencies: An empirical approach to temperature correction [J]. *Insects*, 2024, 15 (5): 342-354.
- Secretariat I, Gullino ML, Albajes R, *et al.* Scientific Review of the Impact of Climate Change on Plant Pests [M]. Rome: FAO on Behalf of the IPPC Secretariat, 2021.
- Shade RE, Furgason ES, Murdock LL. Detection of hidden insect infestations by feeding-generated ultrasonic signals [J]. *American Entomologist*, 1990, 36 (3): 231-235.
- Stejskal V, Vendl T, Li Z, *et al.* Minimal thermal requirements for development and activity of stored product and food industry pests (Acari, Coleoptera, Lepidoptera, Psocoptera, Diptera and Blattodea): A review [J]. *Insects*, 2019, 10 (5): 149-174.
- Sun X, Guo M, Ma M, *et al.* Identification and classification of damaged corn

- kernels with impact acoustics multi-domain patterns [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 150: 152-161.
- Sutanto KD, Al-Shahwan IM, Husain M, et al. Field evaluation of promising indigenous entomopathogenic fungal isolates against red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Dryophthoridae) [J]. *Journal of Fungi*, 2023b, 9 (1): 68-79.
- Sutanto KD, Husain M, Rasool KG, et al. Acoustic comparisons of red palm weevil (*Rhynchophorus ferrugineus*) mortality in naturally infested date palms after injection with entomopathogenic fungi or nematodes, aluminum phosphide fumigation, or insecticidal spray treatments [J]. *Insects*, 2023a, 14 (4): 339-349.
- Tonle FBN, Niassy S, Ndadji MMZ, et al. A road map for developing novel decision support system (DSS) for disseminating integrated pest management (IPM) technologies [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 217: 108526-108545.
- Urairi C, Hoshi T, Ohta I. Development of a new insect pest control device using noncontact force generated by ultrasonic transducers [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2022, 57 (2): 183-192.
- Vinatier F, Vinatier C. Acoustic recording as a non-invasive method to detect larval infestation of *Cosmopolites sordidus* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2013, 149 (1): 22-26.
- Wang JX. Thermal Infrared Multi-scale Observations and Response Mechanism of Pests in Coniferous Forest [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. [王景旭. 针叶林病虫害的热红外多尺度观测与响应机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2020]
- Wang TZ, Zhang JW, Zhang L, et al. Design and research of IEPE piezoelectric vibration sensors with anti-electromagnetic interference and wide frequency response [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36 (1): 9-14. [王天资, 章建文, 张磊, 等. 抗电磁宽频率响应IEPE型压电式振动传感器设计研究 [J]. 传感技术学报, 2023, 36 (1): 9-14]
- Wang YN, Li ST. Multisensor information fusion and its application: a survey [J]. *Control and Decision*, 2001, 5: 518-522. [王耀南, 李树涛. 多传感器信息融合及其应用综述 [J]. 控制与决策, 2001, 5: 518-522]
- Wei HF, Mu JL, Geng WP, et al. Performances of MEMS vibration sensor based on LiNbO₃ single-crystal cantilever-beam [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2022, 59 (7): 665-671. [魏慧芬, 穆继亮, 耿文平, 等. 铌酸锂单晶悬臂梁MEMS振动传感器的性能 [J]. 微纳电子技术, 2022, 59 (7): 665-671]
- Xiang LK, Song K. Development and application of photoelectric sensor [J]. *Intelligence Application*, 2015, 24: 17. [向丽坤, 宋昆. 光电传感器的发展及其应用 [J]. 智能应用, 2015, 1 (24): 17]
- Yang DL. Application and development trend analysis of sensor technology [J]. *Science and Technology Information*, 2007, 1 (24): 362-366. [杨大丽. 传感器技术的应用与发展趋势分析 [J]. 科技信息, 2007, 1 (24): 362-366]
- Zhang ZQ, Zhao ZP, Li ZP, et al. Design of miniaturized airborne oxygen sensor based on Zirconia [J]. *Sensor World*, 2023, 29 (1): 19-22. [张志强, 赵振平, 李哲辉, 等. 基于氧化锆的小型化机载载氧传感器设计 [J]. 传感器世界, 2023, 29 (1): 19-22]
- Zhuang Y, Sun X, Li Y, et al. Multi-sensor integrated navigation positioning systems using data fusion: From analytics-based to learning-based approaches [J]. *Information Fusion*, 2023, 95: 62-90.