

基于微应变感知的高空作业安全防护体系研究

胡玉婷¹, 葛浩文², 张晚晴¹, 石中山³, 汪雪飞⁴

¹池州学院商学院(法学院), 安徽 池州

²池州学院体育学院, 安徽 池州

³池州学院大数据与人工智能学院, 安徽 池州

⁴池州学院机电与工程学院, 安徽 池州

收稿日期: 2025年11月17日; 录用日期: 2025年12月24日; 发布日期: 2026年2月5日

摘要

本文提出的装置通过在安全绳关键部位集成高精度应变片, 实时采集绳索的微小形变数据, 并利用专用信号调理电路与嵌入式算法, 实现对异常受力状态的即时识别与分级预警。同时, 采用UWB与气压计融合的定位技术, 精确获取锚点的三维空间坐标, 通过与预设安全区域比对, 实现了对锚点有效性的智能评估。研究完成了装置的硬件集成与软件开发, 并构建了集数据采集、边缘计算与无线通信于一体的系统原型。测试结果表明, 该装置能有效提升高空作业风险的实时感知与预警能力。

关键词

安全预警, 锚点定位, 高空作业

Research on High-Altitude Work Safety Protection System Based on Micro-Strain Sensing

Yuting Hu¹, Haowen Ge², Wanqing Zhang¹, Zhongshan Shi³, Xuefei Wang⁴

¹School of Business (School of Law), Chizhou University, Chizhou Anhui

²School of Physical Education, Chizhou University, Chizhou Anhui

³School of Big Data and Artificial Intelligence, Chizhou University, Chizhou Anhui

⁴School of Mechanical and Electrical Engineering, Chizhou University, Chizhou Anhui

Received: November 17, 2025; accepted: December 24, 2025; published: February 5, 2026

文章引用: 胡玉婷, 葛浩文, 张晚晴, 石中山, 汪雪飞. 基于微应变感知的高空作业安全防护体系研究[J]. 仪器与设备, 2026, 14(1): 1-6. DOI: 10.12677/iae.2026.141001

Abstract

The proposed device in this paper integrates high-precision strain gauges at key points of safety ropes to capture minute deformation data in real-time. Using dedicated signal conditioning circuits and embedded algorithms, it achieves instant detection and graded warning of abnormal force states. Additionally, by employing a UWB and barometer fused positioning technology, it accurately acquires the three-dimensional spatial coordinates of anchor points. By comparing these coordinates with pre-defined safety zones, the system enables intelligent evaluation of anchor point validity. The research completed the hardware integration and software development of the device and built a system prototype that integrates data acquisition, edge computing, and wireless communication. Test results show that this device can effectively enhance real-time risk perception and early warning capabilities for high-altitude operations.

Keywords

Safety Warning, Anchor Point Positioning, High-Altitude Operations

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在全球化和城市化的浪潮中，中国的建筑行业经历了前所未有的发展。高层建筑如雨后春笋般拔地而起，为城市的现代化建设贡献着力量。然而，这一迅猛发展的背后，也伴随着高空作业安全的挑战。传统的安全防护措施已难以满足现代建筑施工的高标准和严要求，高空坠落事故时有发生，给工人们的生命安全带来了严重威胁。随着现代建筑行业的繁荣，高空作业已经成为建筑、维修、清洁等工作中不可或缺的一部分。然而，高空作业也带来了许多安全隐患，其中最为常见的就是坠落事故。为了保障高空作业的安全，我们必须加强高空作业设施的质量检测。首先，应建立完善的质量检测体系，制定统一的检测标准和流程，确保检测结果的准确性和可靠性。其次，应加强对质量检测的监督管理，确保企业和个人都严格遵守质量检测规定。此外，还应加强对高空作业设施的使用和维护的规范，确保设施的正常运行和安全性。

2. 研究背景与意义

随着我国工业化与城镇化进程的深入推进，电力检修、建筑施工、外墙清洗及大型设备维护等高处作业场景日益增多。高处作业因其环境复杂、风险系数高，长期以来一直是安全生产监管的重点领域。据相关统计数据表明，高处坠落事故在工业事故中占据较高比例，严重威胁着作业人员的生命安全。面对这一严峻形势，中国政府展现出了坚定的决心和前瞻性的视野。国家发展改革委、住房和城乡建设部等多部门联合行动，将高空防坠器项目确定为国家重点支持的安全生产领域创新项目。这一决策不仅彰显了国家对人民生命安全和身体健康的高度重视，更是对建筑行业安全生产标准化、规范化的有力推动。

高空防坠器检测与安全绳检测设备通过其先进的传感器技术和智能算法，实现了对高空作业环境的精确监测。这些设备通常配备有多种传感器，如加速度计、陀螺仪和磁力计，它们能够实时监测作业人员的位置、速度和方向，以及防坠器的工作状态。通过这些数据，设备能够判断作业人员是否存在坠落

的风险,并在必要时自动触发报警系统,向作业人员和现场管理人员发出预警信号。此外,高空防坠器检测与安全绳检测设备还具备数据记录和分析功能。它们能够存储作业过程中的关键数据,如作业时间、位置、设备状态等,这些数据可以用于事后分析,帮助识别潜在的安全风险,并为安全改进提供依据。通过对历史数据的分析,可以发现作业过程中的规律和异常,从而提前采取措施预防事故的发生。为了提高监管效率,设备还支持远程监控功能。通过无线通信技术,安全监管人员可以在办公室内实时监控作业现场的情况,即使不在现场也能及时了解作业人员的安全状况。这种远程监控能力使得安全监管更加便捷和高效,有助于及时发现并解决安全问题。

国内外研究现状

当前,高空作业安全防护技术的研究主要围绕两个维度展开:个体防护装备的智能化与作业环境管理的系统化。在国外,发达国家较早地将传感器技术与个人防护装备相结合,研究重点集中于可穿戴智能设备,如集成加速度计和陀螺仪的智能安全帽,用于监测作业人员姿态与跌落。部分研究已探索利用物联网技术构建广域的作业人员定位与管理系统,但其对安全绳本身状态的实时感知能力仍显不足,预警多为事后响应。国内研究在该领域发展迅速,一方面,传统防坠器的结构优化与可靠性分析仍是基础研究热点;另一方面,随着“智慧工地”概念的兴起,基于视频分析、UWB(超宽带)定位等技术的主动式安全管理系统应用日益广泛。然而,现有系统大多关注“人”的位置与行为,或对“环境”进行监控,对于连接人与环境的“安全绳”这一核心承力部件的健康状态缺乏有效的在线监测手段。综上所述,现有研究在人员定位和环境监控方面已取得一定成果,但将安全绳的微应变实时监测与锚点定位技术深度融合,构建从事前预警到事后追溯的闭环防护体系,仍是当前高空安全领域亟待突破的关键技术瓶颈。

3. 基于微应变与定位的安全防护体系构建

为克服传统高空作业安全防护手段的被动性与滞后性,本文提出一种基于微应变感知与锚点定位技术的主动式安全防护体系。该体系核心理念在于实现安全风险的“事前感知”与“超前预警”,将防护关口从“事故阻断”前移至“风险识别”。体系总体架构设计为四层闭环模型:状态感知层作为体系的数据基础,通过部署在安全绳上的微应变传感器和作业人员身上的定位模块,实时采集安全绳的受力状态与锚点的空间位置信息;风险分析层是体系的智能中枢,内置微应变趋势分析算法与锚点合规性判断模型,对采集到的原始数据进行处理,精准识别如绳索异常受力、老化、冲击以及锚点选择不当等潜在风险;预警决策层依据风险分析结果,结合预设的安全阈值与规则库,自动触发不同等级的预警指令,如现场声光报警、向管理后台推送信息等;最终,信息呈现层通过移动终端或监控平台,将风险信息、人员位置及预警状态可视化呈现,为安全管理人员提供直观的决策依据。该四层结构协同工作,构成了一个从数据采集到风险处置的完整闭环,为构建本质安全型高空作业环境提供了系统性的理论框架与技术路径。

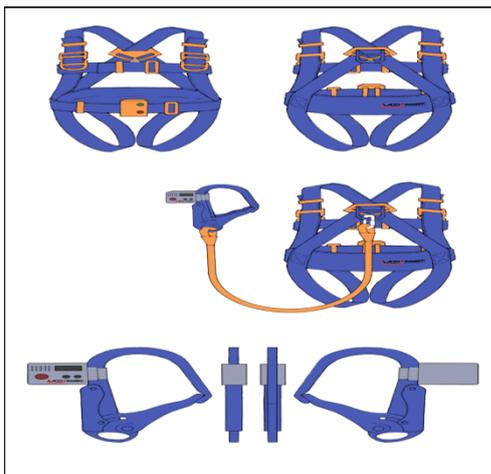
体系核心理念

传统高空作业安全防护理念的核心在于“事后阻断”,即依赖防坠器、安全网等被动式装备,在作业人员发生失足或坠落等极限事件后,通过物理锁止来防止伤害发生。这种模式虽然在一定程度上保障了生命安全,但其本质是一种“底线思维”,无法有效规避事故发生前的潜在风险,且事故本身仍可能对作业人员造成冲击伤害。本体系提出的核心理念,旨在实现从“事后阻断”向“事前预警”的根本性转变。这一转变的基石,正是对安全绳这一核心承力部件健康状态的实时洞察。通过引入微应变感知技术,我们能够将安全绳从被动的保护工具,升级为主动的“风险感知触角”,实时捕捉其受力变化趋势,从

而在绳索出现异常应力、疲劳损伤或锚点存在安全隐患的萌芽阶段，便主动发出预警[1]。这种理念将安全管理的焦点从应对“已发生的事故”转向管理“未发生的风险”，通过提前识别并干预不安全状态，最大限度地减少事故发生的可能性，真正实现从“被动防御”到“主动预防”的跨越，是构建本质安全型作业环境的关键思想。

4. 安全绳微应变预警与锚点定位装置的实现

为将第三章构建的主动式安全防护体系付诸实践，本文研发了“高空安全绳微应变预警与锚点定位装置”。该装置是体系功能的核心物理载体，其实现方案遵循了模块化、低功耗与高可靠性的设计原则。在硬件层面，装置主要由主控单元、微应变采集模块、锚点定位模块、无线通信模块和电源管理单元构成。其中，主控单元选用高性能低功耗 MCU 作为处理器，负责协调各模块工作与数据运算；微应变采集模块通过高精度电阻应变片与专用信号调理电路，实现对安全绳微小形变的精确捕捉；定位模块则采用 UWB 与气压计融合方案，确保在复杂工地环境下仍能获得高精度的三维坐标信息。在软件层面，装置嵌入了核心的边缘计算算法，能够实时解析微应变数据，判断绳索的受力状态(如正常承重、异常冲击、疲劳趋势等)，并结合定位信息评估锚点的合规性。一旦识别出潜在风险，装置将通过本地声光报警与远程无线通信两种方式即时发出预警。软硬件的高度集成，使得该装置不仅是一个数据采集终端，更是一个具备初步智能决策能力的现场执行单元，为整个主动式安全防护体系提供了坚实的技术支撑。



4.1. 微应变预警模块的实现

微应变预警模块是实现主动风险感知的核心。我们选用金属箔式电阻应变片作为传感元件，通过全桥电路设计，将其粘贴于安全绳承力段的特定位置，以实现温度自补偿并最大化灵敏度。信号调理电路以高精度仪表放大器(In-Amp)为核心，对微弱的 mV 级差分信号进行放大和滤波，随后由 MCU 内置的 16 位高分辨率模数转换器(ADC)进行采样，确保了数据采集的精度与稳定性。首先，在安全绳的关键受力区段，通过精密粘贴工艺集成电阻应变片作为核心传感元件，用以将安全绳的微小机械形变线性转换为微弱的电阻值变化。随后，该微弱电信号输入至以高精度仪表放大器为核心的信号调理电路，经过放大、滤波等一系列处理，有效抑制噪声并提升信噪比，最终由高分辨率 ADC 单元转换为可供主控 MCU 处理的数字信号。在软件层面，主控单元内置了基于滑动窗口的实时数据分析算法。该算法通过设定动态阈值，能够有效区分正常作业活动、瞬时冲击载荷以及长期疲劳累积等不同的受力状态，并据此触发分级预警机制。软硬件的协同设计，确保了该模块能够在复杂工况下，为整个安全防护体系提供高可靠

性、低延迟的微应变数据源。

4.2. 锚点定位与有效性评估模块的实现

锚点定位与有效性评估模块是实现主动式安全防护的另一关键环节，其核心功能是精确获取安全绳锚点的空间位置，并依据预设规则对其有效性进行智能评估。在硬件实现上，该模块采用了超宽带(UWB)技术与气压计相融合的定位方案。通过在作业区域部署已知坐标的 UWB 基站，并集成 UWB 标签于本装置中，利用飞行时间测距(ToF)原理，可实现厘米级精度的二维平面定位。同时，气压计通过测量海拔高度差，为系统提供高程数据，二者融合即可解算出锚点的三维空间坐标，有效克服了纯 UWB 方案在垂直方向定位精度不足的问题[2]。

在软件层面，该模块的核心在于锚点有效性评估算法。该算法首先将定位模块解算出的三维坐标与预先构建的作业环境数字模型中的“合规锚点区域”进行实时比对。其次，算法会结合微应变模块提供的初始静载荷数据，综合判断锚点是否具备足够的承重潜力。当系统判定锚点位于非预设区域、结构强度不足或存在其他安全隐患时，将立即生成“锚点无效”的预警信息[3]。该模块的实现，将安全防护的范畴从对人员状态的监测，拓展至对作业环境安全性的主动验证，从而构建了更为全面的立体化安全防线。

5. 装置应用的经济与社会效益分析

前述章节详细阐述了“高空安全绳微应变预警与锚点定位装置”的设计原理与实现方案。本章旨在跳出纯技术视角，从经济与社会两个维度，对该装置推广应用后可能产生的综合效益进行前瞻性分析与评估，以论证其在现实世界中的广泛应用价值与深远意义。

5.1. 经济效益分析

本装置的应用，将为企业和项目带来显著且可量化的经济效益，主要体现在成本控制与效率提升两个方面。首先，在直接成本节约方面，最核心的价值在于事故预防。高空作业一旦发生坠落事故，将引发高昂的直接经济损失，包括但不限于事故善后处理、高额的经济赔偿、设备损坏以及因事故调查导致的长时间项目停工。本装置通过主动预警，能有效将事故风险扼杀于萌芽状态，从而大幅降低此类潜在灾难性支出的发生概率。此外，通过对绳索微应变的持续监控，可避免安全绳因挂点不当或长期过载造成的非正常损耗，科学延长其使用寿命，降低了安全耗材的更换频率与采购成本。其次，在间接效益提升方面，本装置能够优化管理流程，提升作业效率。传统的安全管理依赖于定期的现场人工巡检，不仅耗时耗力，而且存在监管盲区。本装置提供的实时、连续数据流，使得安全管理人员能够远程、动态地掌握所有作业人员的实时状态，将管理模式从“被动响应”转变为“主动干预”，极大地提升了管理效率。同时，一个拥有先进主动安全技术的企业，在市场投标、资质审核中更具竞争力，并能有效降低企业安全生产责任保险的保费，形成良性循环。

5.2. 社会效益分析

相较于经济效益，本装置所带来的社会效益更为深远，其核心在于对“人”的生命价值与尊严的尊重与保护。第一，最核心的社会效益是保障劳动者的生命安全与健康。高空作业是公认的高风险行业，任何一次事故都可能导致一个家庭的破碎。本装置通过技术手段，为每一位高空作业人员构建了一道坚实可靠的生命防线，是“以人为本”发展理念在工业安全领域的具体实践，对于维护社会和谐稳定具有不可估量的作用。其次，本装置将有力推动整个行业的技术升级与标准革新。它成功将物联网、边缘计算等前沿技术引入传统的高空作业安全领域，为行业树立了新的技术标杆。其推广应用将倒逼相关企业

加快技术改造步伐,促进形成更为科学、严格的安全生产标准,从而整体提升我国在该领域的安全管理水平与国际竞争力。最后,本装置有助于塑造负责任的企业形象与健康的行业文化。采用此类先进安全措施,是企业履行社会责任的直接体现,能够增强员工的归属感与安全感,吸引并留住优秀人才。长远来看,这有助于在全社会范围内营造“生命至上、安全第一”的文化氛围,推动安全生产从一种制度约束内化为全行业的自觉行动。

6. 结语

本文围绕高空作业安全这一核心痛点,设计并实现了一套集微应变预警与锚点定位功能于一体的主动式安全防护装置。研究工作从理论构建出发,深入剖析了传统安全防护模式的局限性,进而提出了基于实时数据感知与智能分析的创新性解决方案。在硬件实现上,我们完成了高精度微应变采集模块与UWB融合定位模块的集成与调试;在软件层面,我们开发了能够实时解析数据、精准判断风险的边缘计算算法。通过模块化的设计与软硬件的协同工作,最终成功研制出功能完备、性能稳定的原型装置。理论分析与实验测试结果表明,该装置能够有效监测安全绳的受力状态并实现对锚点有效性的智能评估,显著提升了高空作业安全管理的实时性与前瞻性。更重要的是,本文进一步论证了该装置在降低企业运营成本、提升作业效率方面的巨大经济潜力,以及在保障劳动者生命安全、推动行业技术进步方面所蕴含的深远社会效益。

当然,本研究仍存在可拓展的空间。例如,未来可进一步研究多传感器信息融合算法,以适应更复杂的作业环境;或探索与建筑信息模型(BIM)系统的深度集成,实现安全信息的可视化与全局化管理。我们相信,随着技术的不断迭代与完善,本装置及其所代表的主动式安全理念,必将在未来的智慧工地建设中扮演愈发重要的角色,为守护每一位“高空舞者”的生命安全贡献坚实的科技力量。

参考文献

- [1] 王维. 建筑工程高空作业安全预警与管理探讨[J]. 居舍, 2021(35): 139-141.
- [2] 杨永辉, 李智贤, 王敏蕙, 等. 基于自复位遗传粒子滤波的 UWB/INS 室内定位方法[J/OL]. 华南理工大学学报(自然科学版): 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/44.1251.T.20251009.1204.004>, 2025-11-16.
- [3] 曾宝山. 建筑物地图场景约束条件下的手机多源传感器室内定位方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京建筑大学, 2024.