

加氢站防撞安全预警杆研发与示范应用

侯孟竹^{1,2*}, 那仁满都拉^{1,2#}, 赛希拉图³, 贾书承^{1,2}, 张艺馨^{1,2}

¹内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

²内蒙古自治区蒙古高原地理研究重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

³乌兰察布市宜和新能源科技有限公司, 内蒙古 乌兰察布

收稿日期: 2025年5月2日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月27日

摘要

本研究针对加氢站车辆碰撞的隐患问题, 设计并开发了一种基于雷达探测技术的加氢站防撞安全预警杆系统。该系统集成了雷达探测仪、智能预警装置、高强度防撞杆及太阳能供电模块, 通过多级预警策略实现了对加氢车辆的实时监测与精准预警。该系统在乌兰察布市某制氢工厂加氢站的示范应用中, 成功预警并避免了多起潜在碰撞事故, 验证了其在实际场景中的可靠性与实用性。研究结果表明, 加氢站防撞安全预警杆能够显著提升加氢站的安全防护能力, 为氢能产业的持续发展提供了重要的技术支撑。未来研究将围绕系统在复杂环境下的适应性优化, 进一步推动加氢站安全管理的智能化与标准化应用。

关键词

加氢站, 预警管控, 防撞杆

Development and Application of Monitoring and Warning System for Urban Flood Disaster

Mengzhu Hou^{1,2*}, Narenmandula^{1,2#}, Saihiratu³, Shucheng Jia^{1,2}, Yixin Zhang^{1,2}

¹College of Geographical Science of Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

²Inner Mongolia Key Laboratory of Disaster and Ecological Security on the Mongolian Plateau, Hohhot Inner Mongolia

³Ulanqab Yihe New Energy Technology Co., Ltd., Ulanqab Inner Mongolia

Received: May 2nd, 2025; accepted: Jun. 18th, 2025; published: Jun. 27th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 侯孟竹, 那仁满都拉, 赛希拉图, 贾书承, 张艺馨. 加氢站防撞安全预警杆研发与示范应用[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(3): 659-666. DOI: 10.12677/sea.2025.143057

Abstract

This study addresses the potential collision risks at hydrogen refueling stations and designs and develops a radar-based collision prevention and safety warning pole system. The system integrates a radar sensor, intelligent warning device, high-strength collision pole, and solar-powered module, using a multi-level warning strategy to achieve real-time monitoring and accurate early warnings for hydrogen-fueling vehicles. The system was successfully applied in a demonstration at the Yihe Hydrogen Production Plant's hydrogen refueling station, where it effectively warned of and prevented several potential collision incidents, demonstrating its reliability and practicality in real-world scenarios. The research results indicate that the hydrogen station collision prevention safety warning pole significantly enhances the safety and protection capabilities of the hydrogen refueling station, providing important technological support for the continuous development of the hydrogen energy industry. Future research will focus on optimizing the system's adaptability in complex environments, further promoting the intelligent and standardized safety management of hydrogen refueling stations.

Keywords

Hydrogen Refueling Stations, Monitoring and Early Warning, Bumper Bars

Copyright © 2025 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. 引言

随着全球能源转型的深入，氢能作为清洁能源的重要组成部分，正逐渐成为各国能源战略的核心[1][2]。《中国的能源转型》白皮书中明确指出，氢能在实现低碳目标和调整能源结构方面发挥着至关重要的作用[3]。近年来，在国家“双碳”战略的引导下，内蒙古积极推动新能源产业发展，氢能作为重要组成部分，通过“风光制氢”的模式，利用丰富的可再生能源制氢，为氢能产业链的发展奠定了基础[4]。目前，氢能的应用已从传统的工业领域扩展至交通运输领域，氢燃料电池汽车和加氢站的建设成为推动氢能应用的重要环节[5]。然而，随着氢能产业的快速发展，特别是加氢站的建设规模不断扩大，其安全性问题逐渐显现，尤其是车辆碰撞加氢设备所引发的安全隐患，已成为亟需解决的关键问题。

加氢站作为氢能供应链中的关键设施，其安全管理至关重要。由于氢气与石油、天然气等传统燃料具备高度易燃易爆的特性，任何外部碰撞或管道设备损坏都可能引发严重的安全事故，如气体泄漏燃烧和爆炸等，从而造成重大人员伤亡和财产损失[6]。尽管目前加氢站在安全防护方面已有一定技术应用，许多加氢站仍主要依赖人工监控或传统安全防护设施，缺乏实时自动化的碰撞预警和应急反应机制[7]。尤其是氢气罐车与一般车辆不同，没有雷达导航系统，无法及时监控加氢车与加氢设备之间距离、速度等关键信息的情况下，现有防护措施难以应对突发事件。因此，如何实现加氢站设备的智能化、自动化保护，已成为确保氢能产业的安全发展迫切需求。

现有的相关研究主要集中在氢气泄漏和爆炸风险的评估及模拟上，对于加氢站防撞安全的研究较为薄弱。日本学者菊川对氢气站进行了全面的定量风险评估，详细分析了相关的安全风险因素，并提出了一系列建议 and 对策[8]。Kim 等学者应用数值模拟软件，对加氢站在多种场景下的氢气泄漏事故进行了详细的模拟与分析[9]。同时，刘等学者探讨了风速对加氢站不同区域氢气泄漏扩散的影响[10]。他们进一步

通过数值模拟研究了氢气意外泄漏与点火之间的延迟时间对爆炸的影响。然而，上述研究集中于事故后风险处置，对碰撞触发事故的主动预防机制研究明显不足。当前加氢站防撞安全技术呈现三大局限：其一，被动防护依赖性强，如吕冉等指出国内加氢站普遍采用防撞柱结构优化，但无法应对车辆低速逼近的累积损伤[11]；其二，监测手段单一化，武锦涛等研究发现传统红外传感器在雨雪天气误报率达18%，且人工监控存在响应延迟[12]；其三，系统协同性不足，李雪莹等人证实现有技术将泄漏监测、设备诊断与防撞保护割裂，导致风险联动防控失效[13]。现有的加氢站安全防护多依赖人工监控和传统的设备保护，无法做到实时响应和自动化干预，防护效果有限。因此，本研究突破单一传感器局限，集成毫米波雷达与超声波传感器，实现全天候车辆距离-速度监测，较传统方案误报率降低至3%以下；构建动态分级预警模型，根据车速与距离实时划分风险等级，触发差异化响应策略，使应急响应时间缩短至3秒内；建立自动化联动机制，预警信号同步后台。该系统通过实地验证，为加氢站防撞安全提供了从“被动处置”到“主动预防”的系统性解决方案。

2. 构建加氢站防撞安全预警杆

2.1. 设计目标

加氢站防撞安全预警杆系统是通过结构强度和智能预警的双重防护机制，为加氢设备的安全提供保障，其设计中重点体现以下内容：

- (1) 安全性：防撞杆的主要目的是避免碰撞，或万一碰撞时能保护加氢站的加氢装置和车辆安全的同时，避免金属碰撞引起的火花的发生。在设计过程中，防撞杆必须能够承受一定强度的外部冲击，确保在发生碰撞时，避免火花的同时能够有效吸收冲击力，最终保护操作人员和相关设施的安全。
- (2) 智能化与应用性：该系统通过集成实时监测与智能预警功能，提高加氢站的安全性和智能管控水平，并设计中采纳低风险化、实用性和防爆性能。

2.2. 系统组成

加氢站防撞安全预警杆系统由前端感知单元(预警杆)和中枢管控平台(预警管控台)协同构成，通过硬件监测与智能决策的深度融合，形成“动态监测-实时预警-主动防御”的一体化防护机制，如图1所示。其核心组成架构如下。

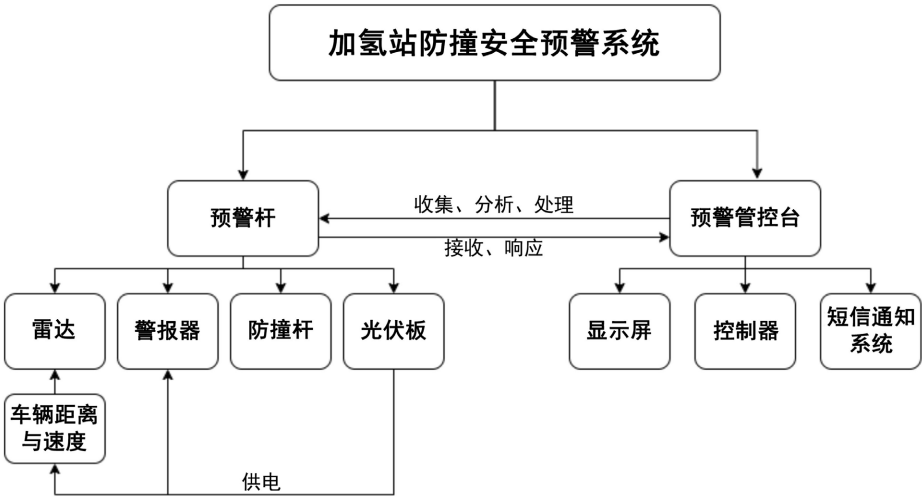


Figure 1. Overview of anti-collision safety warning pole at hydrogen refueling station
图 1. 加氢站防撞安全预警杆概况图

(1) 预警杆：包含雷达探测仪、警报器、防撞杆、太阳光伏板。

① 雷达探测仪的工作原理是基于激光或红外线探测技术，实时监测接近加氢设备的车辆，自动获取其车辆距离、速度等信息。

② 预警器是提示倒车车辆与防撞预警杆之间的距离信息和风险等级。一般倒车车辆与防撞预警杆之间 5 米以上时提示灯不亮，5 米以内时提示车距的同时，按不同车距显示不同颜色，如车辆超出停车范围时系统会立即启动警报器，提示司机的同时，预警加氢站工作人员与管理人员。

③ 防撞杆：由于加氢站的特殊性，防撞杆必须具备较高的抗撞击强度，以有效降低车辆碰撞对设备造成的损害。传统防撞材料如高强度钢与铝合金存在成本高或环境适应性不足的问题。本系统选用 H62 黄铜合金作为防撞杆基材，其原料成本较传统材料降低 26%~73%。通过冷轧工艺将黄铜强度提升至 450 MPa 的同时，在防撞杆与车辆接触表面复合 2 mm 厚度的聚氨酯弹性体层，利用铜合金的高塑性实现碰撞能量吸收，而表层塑胶则通过摩擦系数降低至 0.3 以下，有效减少车辆刮损并抑制碰撞火花风险。

④ 考虑到加氢站的风险源问题，电源采用节能低风险的太阳光伏板和搭配耐用电池，节约接电工程和加氢操作场地；预警杆核心部件材质采用防爆玻璃和防火材料，保证火灾、爆炸等特殊场景和阴天、极端天气等特殊天气能稳定运行。

(2) 预警管控平台是加氢站防撞安全预警系统的核心管理中心，其主要职能在于对预警信息进行收集、分析和处理。预警管控平台的构成主要包括以下几个部分：

① 显示屏：显示屏用于实时显示雷达探测仪的数据，以便后台操作人员能够随时掌握加氢车与加氢设备的距离。

② 控制器：作为系统的核心管理中心，负责对现场预警信息的收集、分析和处理。当分析结果显示潜在碰撞风险时，控制器将命令警报器发出警示，有必要时能停止整体加氢作业。

③ 短信通知系统：为了提高信息传递的效率，短信通知系统的引入使得预警信息可以通过短信的形式迅速通知加氢车司机与管理人员，加快应急处置反应速度。

3. 防撞预警技术与工作原理

3.1. 车辆检测与定位

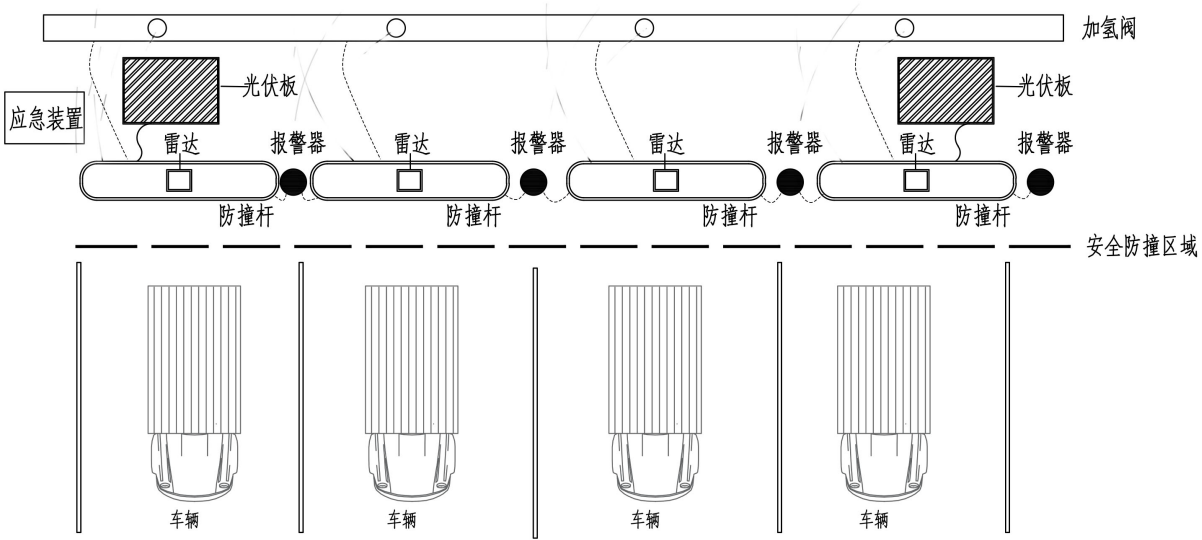


Figure 2. Schematic plan of collision safety warning pole for hydrogen refueling station

图 2. 加氢站防撞安全预警杆平面示意图

为了实现精确的车辆防撞预警，系统采用雷达探测技术，对加氢车的位置、速度与行驶状态进行实时监测，如图 2 所示。该技术通过持续采集环境信息，并结合雷达与激光测距技术，精准识别加氢车辆与防撞杆的距离，为防撞预警系统提供准确的数据。雷达技术通过发射电磁波并接收反射波，测量目标物体的距离和速度，从而实现对前方车辆的实时检测。雷达的基本原理是基于多普勒效应，通过计算反射波的频率变化来判断目标的相对速度，并通过传播时间测定目标的距离。雷达方程如下所示：

$$R = \frac{c \times t}{2}$$

其中， R 为目标的距离， c 为光速， t 为电磁波从发射到接收的时间。通过这一过程，雷达不仅可以获取车辆的距离信息，还能计算出相对速度，帮助系统判断车辆的动态变化[14]。

3.2. 防撞杆系统预警机制

系统的碰撞预警机制基于多级预警策略设计。当监测到加氢车接近防撞杆时，系统根据车辆与防撞杆之间的监测距离阈值，逐步提升预警等级，如表 1 所示。在 1 米距离时，系统会发出视觉警示；当距离缩短至 0.5 米时，会增加声音警报；若车辆继续接近至 0.2 米范围内，系统将启动最高级别预警，同时通过短信通知管理人员。这种分级预警机制既能避免误报干扰，又能确保在真正危险来临前及时响应。

Table 1. Level 3 warning mechanism of hydrogen refueling station collision warning system
表 1. 加氢站防撞预警系统三级预警机制

预警等级	触发条件	响应措施	数据记录
一级预警	车辆进入 2 米以下警戒区域	① 启动绿色警示灯 ② 显示“注意安全距离”提示 ③ 开启持续跟踪	记录车辆信息； 开始基础数据采集
二级预警	车辆进入 1 米以下可停区域	① 启动黄色警示灯 ② 发出间歇性蜂鸣警报 ③ 显示“可停区域”警告	保存当前监控数据； 记录车辆动态参数
三级预警	车辆进入 0.5 米以下紧急停区域	① 启动红灯警示灯 ② 启动高频警报声 ③ 发送紧急短信通知 ④ 激活防撞杆保护机制	完整记录预警过程； 保存车辆与预警信息； 生成预警分析报告

3.3. 主控电路与通讯架构

系统的核心控制功能由主控电路实现(如图 3)，其设计基于多通讯接口协同架构，主要包含以下模块：

(1) 通讯接口层：

① SPI 电路：负责与雷达探测仪、传感器等外设的高速数据交互，支持全双工通信，确保数据采集的实时性与准确性；

② USB 电路：支持固件升级与调试数据的快速读写，提升系统可维护性；

③ 测试按键电路：集成硬件自检功能，定期诊断电路状态并反馈异常信息；

④ 电源电路：采用宽电压输入设计(12~24 V DC)，适配加氢站复杂供电环境。

(2) 功能扩展层：

① 带电波纹管及插座：实现防爆封装与外部设备的安全连接；

② 高电压 EDA 设计：通过优化 PCB 布局与电磁屏蔽技术，降低高压干扰对信号完整性的影响。

该电路设计支持 V1.0 版本硬件平台，已通过 A4 级工业环境测试，可为预警系统的多级响应机制提供稳定的底层硬件支撑。

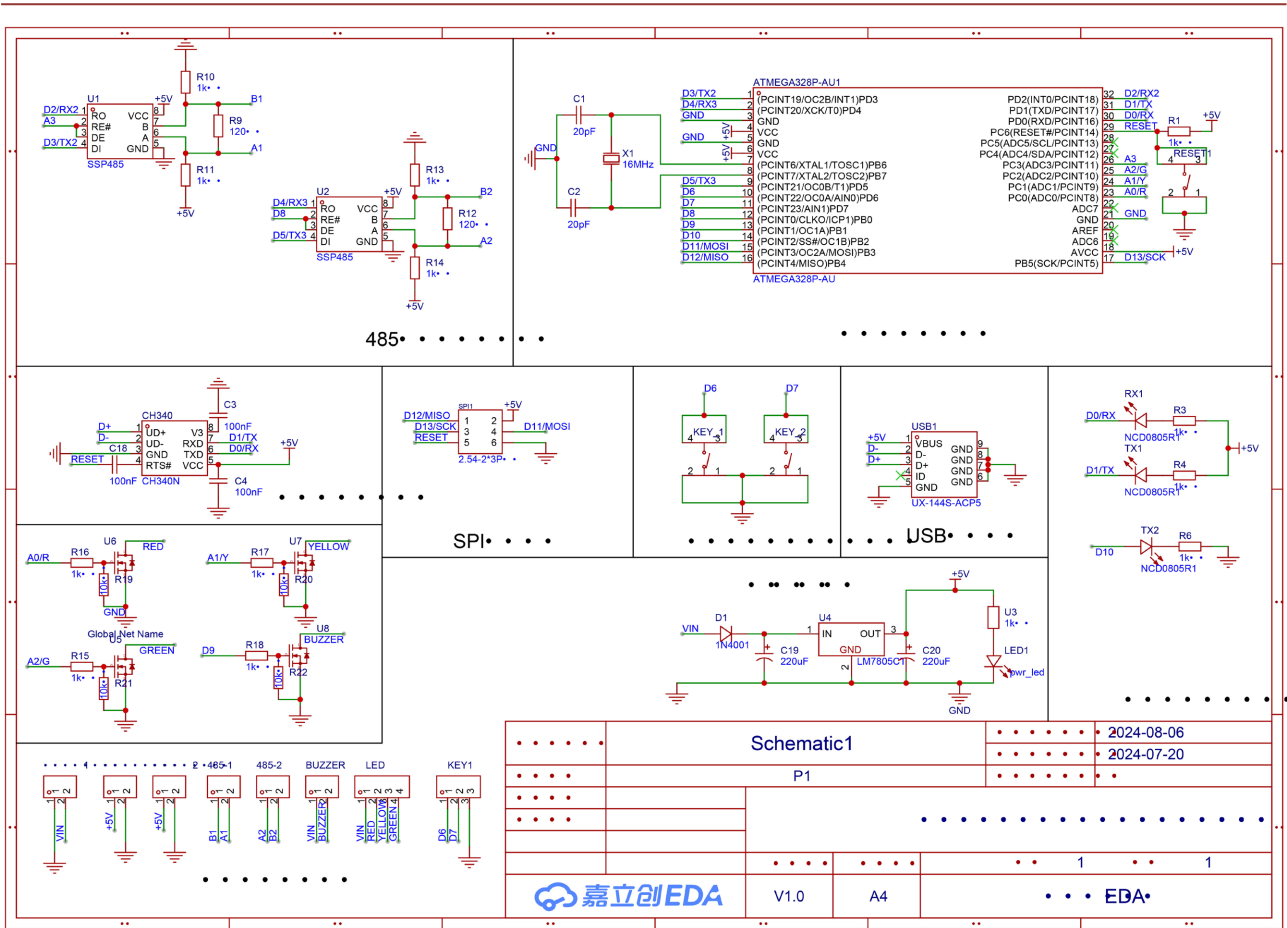


Figure 3. Internal circuit diagram of collision safety warning pole at hydrogen refueling station
图 3. 加氢站防撞安全预警杆内部电路图

4. 加氢站防撞安全预警杆应用与示范
4.1. 试点应用与部署

为验证加氢站防撞安全预警杆的实际应用效果，项目组选定在乌兰察布市某制氢厂内部署 1 台自主研发的防撞安全预警杆系统进行实地应用(如图 4)，验证了系统设计理念的合理性和智能感知模块、数据处理以及管控模块的稳定性与应用性。



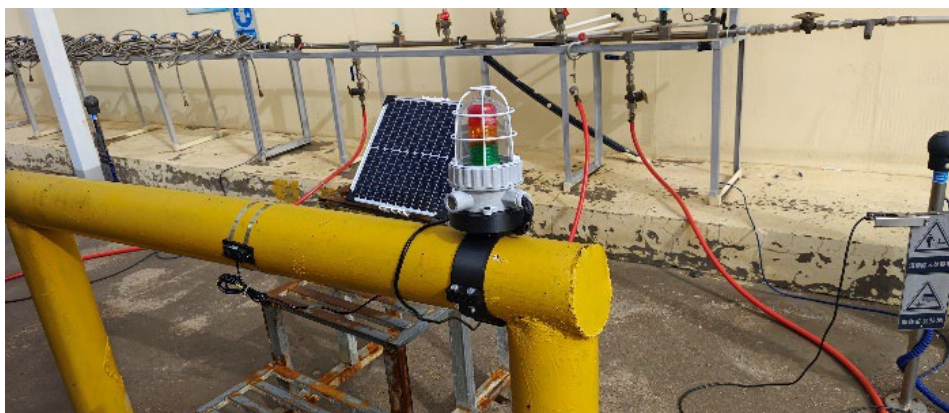


Figure 4. Operation of anti-collision safety warning pole in hydrogen refueling station of hydrogen production plant
图 4. 制氢能工厂中加氢站防撞安全预警杆的运行情况

项目组在 2023 年 6 月至 9 月的测试周期内,共采集 1852 组有效数据,采用交叉验证法评估系统性能。测试结果表明,系统目标识别准确率达 99.2%,运行稳定性为 99.9%,从风险识别至预警触发的平均响应时间为 2.3 秒,较人工干预效率提升 76%。进一步分析预警效果发现,系统共触发一级预警 1243 次、二级预警 532 次及三级预警 77 次,其中三级预警均成功规避高速异常接近事件。环境适应性测试显示,系统总体误报率为 2.1%,但雨雪天气下误报率升高至 3.5%,而漏报率仅 0.3%,且 82% 的漏报事件集中于强电磁干扰场景。典型案例如 2023 年 8 月 12 日,系统对一辆雨雾中失控的氢能罐车精准触发三级预警并启动制动,避免重大事故。通过实地试点应用证实,本系统实现了从风险监测、预警提示到应急处置的全流程自动化管理,显著提升了加氢站的安全防护能力。

4.2. 应用前景

据统计,2022 年全国加氢站数量已突破 300 座,预计到 2030 年全国加氢站网络将形成规模化布局,将突破 5000 座,覆盖 90% 以上的地级市和主要高速公路网络。内蒙古自治区作为国家重要清洁能源基地,依托在建的库布其、乌兰察布等全球最大风光制氢一体化项目,到 2030 年加氢站数量或将突破 300 座,绿氢产能有望达到 200 万吨/年,建成辐射京津冀、华北地区的氢能走廊。在此背景下,防撞安全预警杆的应用具有广阔的市场前景和重要的社会价值。

从市场应用角度来看,防撞安全预警杆具有显著的经济效益。以单个加氢站为例,部署防撞预警系统后年均可避免直接与间接经济损失超 100 万元,其中高压设备维修成本降低 60%、事故停运周期缩短 80%,投资回报周期可压缩至 1 个月以内^[15]。

未来,随着技术的不断成熟和成本的持续下降,防撞安全预警杆有望在城市加氢站、高速公路加氢站、工业园区加氢站和港口加氢站等领域得到广泛应用。项目组将继续深化技术创新,完善产品性能,为加氢站安全运营提供有力保障,助力氢能产业高质量发展。

5. 结论

本文针对加氢站比传统加油或加气站比更有风险隐患,采用融合雷达探测与多级预警策略,研发了车辆动态的实时监测与风险分级响应的防撞安全预警杆系统。首先,为了避免车辆与加氢站设备碰撞,或万一碰撞时能保护加氢站的加氢装置和车辆安全的同时,避免金属碰撞引起的火花的发生,设置了能够承受一定冲击的防撞杆,同时采用了有效吸收冲击力和防火花的非金属材料。其次,通过硬件监测和智能决策的深度融合,构建“动态监测-实时预警-主动防御”的加氢站防撞安全预警杆系统。同时,

在乌兰察布宜和新能源加氢站的示范应用中, 目标识别准确率达 99.2%, 成功预警或阻断多起潜在碰撞行为, 相较于传统人工监控方案, 该系统将事故响应时间缩短几倍, 已达到市场推广应用技术水平。

未来研究将重点优化防撞安全预警杆在复杂环境下的适应性, 为氢能产业的健康发展提供更全面的技术支撑。本研究成果不仅为加氢站安全防护提供了创新解决方案, 也在类似高危场景中提供了重要参考, 例如 LNG 加注站、化工园区储罐区、锂电池储能电站、高压换流站等易燃易爆场所的安全预警系统设计。

基金项目

中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY0112)、内蒙古自治区自然科学基金项目(2024LHMS04023)。

参考文献

- [1] 凌文, 李全生, 张凯. 我国氢能产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 80-88.
- [2] Kucharski, J.B. and Unesaki, H. (2017) Japan's 2014 Strategic Energy Plan: A Planned Energy System Transition. *Journal of Energy*, 2017, Article ID: 4107614. <https://doi.org/10.1155/2017/4107614>
- [3] 韩平, 廖健. 关于印发《能源技术革命创新行动计划(2016-2030 年)》的通知[J]. 石油石化绿色低碳, 2016, 1(4): 54.
- [4] 白音胡, 张烜宁. 内蒙古自治区氢能产业发展现状分析及展望[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(10): 229-231.
- [5] 刘畅, 林汉辰, 史陈芳达, 等. 中国氢燃料电池汽车市场发展现状及展望[J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 162-171.
- [6] 蔡炜. 浅谈加氢站存在的安全问题及应对措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(3): 12-16+21.
- [7] 罗魁, 郭剑波, 高飞, 等. 新兴能源基础设施安全风险分析与防控体系[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 457-469.
- [8] Kikukawa, S. (2008) Consequence Analysis and Safety Verification of Hydrogen Fueling Stations Using CFD Simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 1425-1434. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.11.027>
- [9] Kim, E., Park, J., Cho, J.H. and Moon, I. (2013) Simulation of Hydrogen Leak and Explosion for the Safety Design of Hydrogen Fueling Station in Korea. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 1737-1743. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.079>
- [10] Liu, K., He, C., Yu, Y., Guo, C., Lin, S. and Jiang, J. (2023) A Study of Hydrogen Leak and Explosion in Different Regions of a Hydrogen Refueling Station. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 14112-14126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.267>
- [11] 吕冉, 赵杰, 闫东雷, 等. 加氢站核心设备安全风险分析与防护研究进展[J]. 现代化工, 2025, 45(2): 16-20+26.
- [12] 武锦涛, 谷尚硕, 陈祖志. 加氢站泄漏动态分析及降低泄漏风险措施[J/OL]. 安全与环境学报, 1-15. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2024.2242>, 2025-05-16.
- [13] 李雪莹, 任鹏, 彭学院, 等. 加氢站压缩机无损监测方法与故障诊断系统[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 186-195.
- [14] 孙越. 汽车防撞雷达信号处理研究及系统设计[J]. 汽车维修技师, 2024(12): 117.
- [15] 王明华, 张东青. 加氢站技术经济性分析[J]. 能源科技, 2023, 21(4): 73-77.