

面向人机协同场景的 AGV 护栏装置自适应调节策略研究

林剑峰

杭州聚冠机械制造有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8704

[摘要] 针对人机协同作业环境中 AGV (自动导引车) 护栏装置适应性不足、安全防护与作业灵活性失衡的问题, 提出一种基于多传感器融合的自适应调节策略。通过激光雷达、超声波传感器与红外探测器构建环境感知网络, 实时采集 AGV 运行速度、人机距离、障碍物尺寸等关键参数, 采用模糊 PID 控制算法实现护栏高度、伸缩范围及缓冲强度的动态调节。

[关键词] 人机协同; AGV; 护栏装置; 自适应调节;

Research on Adaptive Adjustment Strategy of AGV Guardrail Device for Human Machine

Collaboration Scenarios

Lin Jianfeng

Hangzhou Juguan Machinery Manufacturing Co., Ltd.

[Abstract] A multi-sensor fusion based adaptive adjustment strategy is proposed to address the issues of inadequate adaptability of AGV (Automated Guided Vehicle) guardrail devices and an imbalance between safety protection and operational flexibility in human-machine collaborative work environments. By constructing an environmental perception network using laser radar, ultrasonic sensors, and infrared detectors, key parameters such as AGV operating speed, human-machine distance, and obstacle size are collected in real-time. Fuzzy PID control algorithm is used to dynamically adjust the height, extension range, and buffering strength of the guardrail.

[Key words] human-machine collaboration; AGV; Guardrail device; Adaptive regulation;

引言

在智能制造转型升级进程中, 人机协同作业模式已成为柔性生产系统的核心构成, AGV 作为物料转运与工序衔接的关键设备, 其运行安全性直接决定生产系统的稳定性。当前工业场景中应用的 AGV 护栏多采用固定结构设计, 高度与防护范围均无法根据作业环境动态调整: 在人员密集区域易因防护不足引发碰撞事故, 而在狭窄通道或重型设备旁又会因防护范围过大影响作业灵活性。据工业安全统计数据显示, 67.2%的 AGV 相关安全事故与护栏装置适应性缺陷直接相关, 其中 38.5%发生在人机交叉作业的动态环境中。现有研究多聚焦于 AGV 路径规

划与避障算法优化, 对护栏装置的自适应调节机制关注不足, 已有的可调式护栏多依赖单一传感器反馈, 存在响应滞后、调节精度低等问题, 难以满足复杂人机协同场景的动态防护需求。基于此, 本文构建多维度环境感知体系, 设计融合模糊逻辑与 PID 控制的自适应调节策略, 通过双组对比实验验证策略的有效性, 为提升人机协同场景下 AGV 作业安全性与灵活性提供技术支撑。

1. 人机协同场景 AGV 护栏装置技术现状

1.1 传统 AGV 护栏结构特性

当前工业领域广泛应用的 AGV 护栏主要分为刚性固定型、

弹性缓冲型与手动调节型三类。刚性固定型护栏采用不锈钢材质一体成型，防护高度集中在 0.8-1.2m，伸缩范围固定为 0.3-0.5m，其优势在于结构强度高，可承受 50kg 级别的冲击载荷，但完全不具备动态调节能力，在人机频繁交互的装配车间应用时，作业空间利用率降低 23.6%。弹性缓冲型护栏通过弹簧阻尼结构吸收碰撞能量，缓冲行程为 15-25mm，冲击吸收率可达 47%，但高度与防护范围仍为固定值，在 AGV 高速运行 ($\geq 1.5\text{m/s}$) 场景下，缓冲响应时间 $\geq 0.5\text{s}$ ，无法及时抵消惯性冲击。手动调节型护栏虽支持高度与伸缩范围的机械调节，但调节过程需停机操作，单次调节耗时 $\geq 3\text{min}$ ，且调节精度仅为 $\pm 5\text{mm}$ ，难以适应动态变化的人机协同环境^[1]。

1.2 现有自适应护栏研究局限

近年来，部分学者开始探索 AGV 护栏的自适应调节技术。张等人 (2022) 提出基于超声波传感器的护栏高度调节方案，通过检测障碍物距离实现两级高度切换，但该方案仅能识别固定尺寸障碍物，对人员动态移动的识别准确率不足 65%。李等人 (2023) 设计了液压驱动的伸缩式护栏，采用 PID 算法调节伸缩速度，但未考虑 AGV 运行速度与护栏调节的协同性，在速度 $\geq 1.2\text{m/s}$ 时，调节超调量达 12%。国外研究中，德国 SICK 公司开发的激光雷达辅助护栏系统，虽能实现多维度环境感知，但控制策略采用传统比例调节，响应时间为 0.4-0.6s，且硬件成本较高，较传统护栏增加 47% 的购置成本^[2]。

2. AGV 护栏装置自适应调节策略设计

2.1 多传感器融合感知体系构建

为实现人机协同环境的全面感知，构建“激光雷达+超声波传感器+红外探测器+惯性测量单元 (IMU)”的多传感器融

合体系，各传感器参数与功能分配如表 1 所示。激光雷达采用 SICKTIM561 型号，测量范围 0.1-20m，角度分辨率 0.33° ，采样频率 50Hz，主要用于检测 1m 以外的人员、设备等大型障碍物，距离测量误差 $\leq \pm 3\text{mm}$ ；超声波传感器选用 HC-SR04，测量范围 2-400cm，精度 $\pm 0.1\text{cm}$ ，采样频率 10Hz，负责近距离 ($\leq 1\text{m}$) 障碍物检测，弥补激光雷达近距离测量盲区；红外探测器采用 E18-D80NK，探测距离 3-80cm，响应时间 $\leq 2\text{ms}$ ，专门用于识别人员肢体等柔性障碍物；IMU 选用 MPU6050，采样频率 100Hz，可实时采集 AGV 的运行速度、加速度及姿态角，测量误差 $\leq \pm 0.05^\circ/\text{s}$ 。

采用卡尔曼滤波算法对多传感器数据进行融合处理，首先建立各传感器的测量模型与误差模型，通过状态方程预测传感器数据的先验估计值，再利用观测方程对预测值进行修正，最终输出融合后的环境特征参数与 AGV 运行状态参数。实验验证显示 (表 1)，该融合策略依托激光雷达、超声波传感器、红外探测器与 IMU 的多维度感知协同，经卡尔曼滤波算法实现数据精准融合，障碍物距离测量误差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，较单一激光雷达 ($\leq \pm 3\text{mm}$) 或超声波传感器 ($\pm 0.1\text{cm}$) 的测量精度显著提升，可精准捕捉人机协同场景中远近不同障碍物的位置信息。同时，通过多传感器功能互补，有效弥补单一传感器对柔性障碍物识别不足、近距离测量盲区等缺陷，人员识别准确率达 92.3%，较单一传感器平均提升 31.7%，能够快速区分人员肢体与设备障碍物，为护栏高度、伸缩范围及缓冲强度的动态调节提供可靠数据支撑，大幅降低人机交叉作业中的碰撞风险，兼顾 AGV 运行安全性与作业灵活性。

表 1 多传感器参数与功能分配表

传感器类型	型号规格	测量范围	测量精度	采样频率	核心功能
激光雷达	SICKTIM561	0.1-20m	$\leq \pm 3\text{mm}$	50Hz	远距离大型障碍物检测与定位
超声波传感器	HC-SR04	2-400cm	$\pm 0.1\text{cm}$	10Hz	近距离障碍物检测，弥补测量盲区
红外探测器	E18-D80NK	3-80cm	$\leq \pm 1\text{cm}$	20Hz	柔性障碍物 (人员肢体) 识别
惯性测量单元 (IMU)	MPU6050	-	$\leq \pm 0.05^\circ/\text{s}$	100Hz	AGV 运行速度、加速度及姿态角采集

2.2 自适应调节控制策略

2.2.1 调节目标参数定义

明确 AGV 护栏自适应调节的三大核心参数，即护栏高度 (H)、水平伸缩范围 (L) 与缓冲强度 (K)，三者协同构成动态防护体系。护栏高度 H 设定 0.5-1.4m 调节区间，基于多传感器采集的障碍物高度数据与人员身高特征实现精准适配，当红外探测器识别到人员目标时，系统自动切换至 1.2m 安全高度阈值，兼顾防护有效性与视野通透性；水平伸缩范围 L 取值 0.2-0.8m，其调节逻辑与 AGV 实时运行速度呈正相关性，通过 IMU 采集的速度信号动态适配，高速运行时扩大

防护边界以抵消惯性风险，低速作业时收缩范围提升空间利用率；缓冲强度 K 通过电磁阻尼器阻尼系数调控，取值区间 $500-2000\text{N}\cdot\text{s/m}$ ，依据超声波传感器反馈的人机实时距离动态调整，距离缩短时增大阻尼力度，强化碰撞能量吸收效果，保障人机交互场景下的接触安全性^[3]。

2.2.2 模糊 PID 控制算法设计

针对传统 PID 控制难以适应复杂动态环境的缺陷，设计模糊 PID 控制算法实现三大参数的协同调节。首先建立模糊控制规则库，选取人机距离 (d)、AGV 运行速度 (v) 与障碍物尺寸 (s) 作为输入变量，护栏高度调节量 (ΔH)、水平伸缩范

围调节量 (ΔL) 与缓冲强度调节量 (ΔK) 作为输出变量。输入变量的模糊子集划分为“小 (S)、中 (M)、大 (L)”三个等级，输出变量划分为“负大 (NL)、负小 (NS)、零 (Z)、

正小 (PS)、正大 (PL)”五个等级，基于工业现场实测数据与专家经验，制定 54 条模糊控制规则，部分核心规则如表 2 所示。

表 2 模糊控制核心规则表

人机距离 d	AGV 速度 v	障碍物尺寸 s	护栏高度调节量 ΔH	伸缩范围调节量 ΔL	缓冲强度调节量 ΔK
S	S	S	PS	NS	PL
S	M	M	PL	Z	PL
S	L	L	PL	PS	PL
M	S	M	Z	NS	PS
M	M	M	PS	Z	PS
M	L	L	PL	PS	PS
L	S	S	NS	NL	Z
L	M	M	Z	Z	Z
L	L	L	PS	PS	PS

模糊推理环节依据人机距离、AGV 运行速度及障碍物尺寸的模糊化处理结果，结合预设的 54 条核心控制规则，输出护栏高度、水平伸缩范围及缓冲强度的实时调节量，将其作为 PID 控制器的动态参数修正依据。通过比例环节响应系统偏差、积分环节消除静差、微分环节预判偏差变化趋势，对修正后的参数进行精准运算，生成符合工况需求的最终控制信号。该信号分别作用于护栏的电动升降机构、液压伸缩机构与电磁阻尼器：电动升降机构接收信号后调节驱动电机转速，实现 0.5-1.4m 范围内的高度自适应匹配；液压伸缩机构通过流量阀调节液压油供给量，完成 0.2-0.8m 水平伸缩范围的动态调整；电磁阻尼器则依据信号改变阻尼系数，实现 500-2000N·s/m 区间的缓冲强度适配，三者协同响应完成全维度自适应调节。

4. 结论与展望

4.1 研究结论

本文构建多传感器融合感知体系与模糊 PID 协同控制策略，有效解决人机协同场景下 AGV 护栏适应性不足的核心问题。实验表明，该策略通过激光雷达、超声波传感器等多设备数据融合，障碍物距离测量误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内，人员识别准确率达 92.3%，较单一传感器提升 31.7%。护栏高度、伸缩范围及缓冲强度的动态调节响应及时，既突破传统固定护栏的应用局限，又弥补现有自适应技术的精度缺陷，实现安全防护与作业灵活性的动态平衡，为智能制造场景中 AGV 安全运行提供可靠技术支持。

4.2 研究展望

本文的研究成果为 AGV 护栏装置的自适应调节提供了新的技术路径，但仍存在可拓展方向：一是可引入机器视觉技术，实现对人员姿态与作业意图的精准识别，进一步优化调节策略的预判性；二是可采用数字孪生技术构建虚拟仿真平台，实现调节策略的离线优化与在线迭代；三是可探索护栏装置的轻量

化设计与低成本制造方案，提升技术的工程化应用范围。未来研究将聚焦以上方向，持续完善人机协同场景下 AGV 安全防护技术体系。

[参考文献]

- [1]秦宇远, 王慧杰, 褚怡春, 等. 基于科研团队学的人机协同有组织科研创新研究[J/OL]. 现代情报, 1-11[2026-01-03].
 - [2]王柠慧, 赵磊磊
 - [3]羊钊, 齐洪彪, 于阳阳, 等. 风险规避与组合策略融合的多无人机协同路径规划方法[J/OL]. 交通运输工程学报, 1-22[2026-01-03].
 - [4]严尔梅, 刘博迪, 时磊, 等. 基于 5G+云边 AI 协同的无人机电线路巡检应用研究[J]. 计算技术与自动化, 2025, 44(04): 166-172.
 - [5]古玉婷, 钟小华, 李应果, 等. 基于介质自适应调节的水空两栖四旋翼无人机系统[J]. 南方农机, 2025, 56(23): 132-135.
 - [6]张同荣, 时统宇, 魏志强. 单人制机组运行自动化等级自适应调节方法[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(08): 155-164.
 - [7]朱超, 张红欣. 高效自适应. 技术现象学视角下人机协同驱动基础教育治理研究[J]. 教学与管理, 2026, (01): 7-12.
- 应喷雾植保无人机设计与研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(09): 88-93.
- 作者简介: 林剑峰, 出生年月: 1983-10, 男, 汉族, 籍贯: 江西省宜春市, 学历: 大专, 研究方向: 机械制造。