

# 中国大学生计算机设计大赛



## 物联网应用类作品技术文档

作品编号： 2025046112

作品名称： 基于卡尔曼滤波和 SARIMA 模型的人流密度检测系统

作 者： 张文哲、刘晨旭

版本编号： v1.0.0

### 填写说明：

- 1、本文档适用于物联网应用类作品；
- 2、正文一律用五号宋体，一级标题为二号黑体，其他级别标题如有需要，可根据需要设置；
- 3、本文档为简要文档，不宜长篇大论，简明扼要为上；
- 4、提交文档时，以 PDF 格式提交本文档；
- 5、本文档内容是正式参赛内容组成部分，务必真实填写；如不属实，将导致奖项等级降低甚至终止本作品参加比赛。

填写日期： 2025.4.19

# 第 1 章 作品概述

本作品为基于卡尔曼滤波和 SARIMA 模型的人流密度检测系统，本系统适用于图书馆、商场、地铁站等人流密集的公共场所，专注于城市管理和公共安全领域的人流监测、分析与预警。

## 主要功能

本系统实现了实时人流密度检测，通过卡尔曼滤波算法融合多传感器数据，实时监测特定区域人流密度，并将使用 HTTP 协议将密度信息实时上传至云端。

在云端服务器运行有基于 Python 的 FastAPI 提供 Restful 风格的 HTTP API，可以实时接收边缘测提供的人流密度信息并提供给前端可视化页面。同时，该服务器运行有基于 SARIMA 的时间序列模型，可以通过集成化的模型脚本训练得到最有参数并生成预训练的模型供服务器调用，以周期性预测未来人流变化趋势。

前端界面使用原生 HTML、CSS 与 JavaScript 开发，通过 Chart.js 与 HeatMap 等开源组件实现数据的表格化、热图化，并预设绿、黄、红三种颜色区别人流密度大小，做到人流密度的三级预警。

## 创新性说明

设计思路，采用三层架构（数据采集层、服务器处理层、应用展示层）实现数据流的高效处理。边缘测程序和服务器程序架构的模块化与可扩展设计允许系统轻松集成新型传感器和预测模型。

技术实现上，在边缘测采用自适应卡尔曼滤波算法，动态调整传感器权重并测量噪声协方差。在服务器侧，采用多尺度 SARIMA 预测模型，支持小时级和日级人流预测。同时，在服务器侧实现分布式数据采集与存储架构，集合内存缓存与日期分片存储，实现序列化数据存储。

硬件方面，使用 GPIO 红外传感计数器与 WiFi 探针，结合红外传感器的精度优势和 WiFi 传感器的范围又是，综合探测特定范围内的人流密度。同时，在边缘侧运行卡尔曼滤波算法，使计算压力分摊到边缘。整个系统的边缘节点支持网络分布式部署，支持大范文、多节点的数据采集网络。

应用方面，通过 Web 技术构架轻量且清晰的可视化也米娜，通过热力图、趋势图和预警系统多维度只管地呈现人流情况。由于该作品采用高内聚低耦合的模块化设计，可以轻松将预测场景扩展至不同地点。

# 第 2 章 需求分析

## 项目背景及意义

随着城市化进程加速，有效监测和预测人流密度成为城市管理和公共安全的关键环节。在图书馆、商场、地铁站等人流密集场所，实时准确的人流监测对预防踩踏事故、优化空间

利用和提高服务质量具有重大意义。本项目旨在开发一套智能化人流密度监测与预测系统，通过多传感器融合和先进数据处理算法，实现特定区域人流密度的实时监测、分析和趋势预测。

## 市场需求与用户分析

本系统主要面向如下群体：

- 公共场所管理人员
- 城市规划与管理部门
- 安全监控与应急管理人员
- 商业数据分析团队

以上的用户群体，核心需求应包括：实时掌握人流情况、预测人流高峰时段、优化资源分配、提升安全管理水平和改善用户体验。

## 核心功能

**多元数据采集** 通过红外传感器实现精确人员计数，同时利用 WiFi 探针获取广域设备分布信息。这两种互补技术的结合确保了覆盖范围和精度的平衡。

**实时监测与数据融合** 采用卡尔曼滤波算法对多源传感器数据进行噪声过滤和智能融合。系统动态调整各传感器权重，提高复杂环境下的测量精确度。

**人流密度预测** 基于 SARIMA 时间序列模型分析历史数据，预测未来 24 小时人流变化趋势。考虑日周期和季节性因素，为场所管理提供决策支持。

**可视化展示与预警** 通过热力图直观展示空间人流分布，结合趋势图表呈现时间维度变化。多维度可视化界面支持交互式分析，帮助用户快速理解人流状况。

## 竞品分析

对比维度	本系统	竞品 A-摄像头视觉分析	竞品 B-WiFi 分析系统	竞品 C-传统红外计数器
数据源	多传感器融合(红外+WiFi)	单一摄像头	单一 WiFi 探针	单一红外传感器
测量精度	>95%(融合优势)	90%(受光照影响)	75%(设备/人不一致)	85%(易受环境干扰)
覆盖范围	中-大范围	小-中范围	大范围	小范围(通道)
隐私保护	高(无直接采集个人图像)	低(需采集人像)	中(MAC 地址可匿名化)	高(仅计数)
部署成本	中等	高(高清摄像系统)	低-中	低
预测能力	高(SARIMA 模型)	中-高(视觉 AI)	中(简单统计模型)	低(无预测功能)
实时性	高( $\leq 1$ 秒延迟)	中(视频处理延迟)	高	高
可扩展性	高(模块化设计)	中	中	低

对比维度	本系统	竞品 A-摄像头视觉分析	竞品 B-WiFi 分析系统	竞品 C-传统红外计数器
环境适应性	高(多源融合抗干扰)	低(受光照影响大)	中(受信号强度影响)	低(易受温度影响)

## 竞争优势

- 多源数据融合带来的更高测量精度
- 更强的环境适应能力和抗干扰性
- 兼顾高精度与广覆盖的平衡
- 更完善的预测分析能力
- 更灵活的模块化架构和扩展性

## 第 3 章 技术方案

### 硬件组成与来源

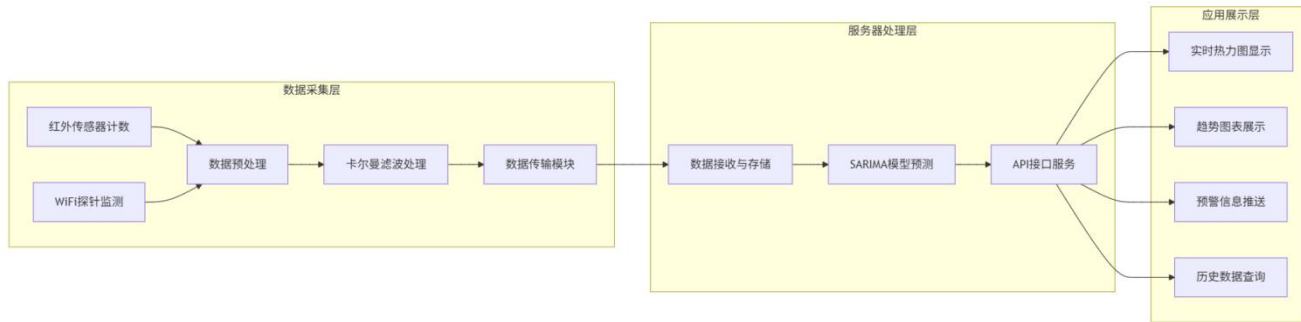
基本硬件包括树莓派 4B、基于 LM393 的红外避障模块和 TZ-DT06 WiFi 探针模块，通过 GPIO 连接至树莓派调用，其引脚连接如下：

红外传感器连接：入口(GPIO 17/物理引脚 11)、出口(GPIO 27/物理引脚 13)、自习室(GPIO 22/物理引脚 15)，每个传感器需连接 VCC 至 3.3V 或 5V、GND 至地线、OUT 至指定 GPIO。  
WiFi 探针模块：入口(RX=GPIO 23/物理引脚 16，TX=GPIO 24/物理引脚 18)、阅览室(RX=GPIO 10/物理引脚 19，TX=GPIO 9/物理引脚 21)，每个模块需连接 VCC、GND 及交叉连接 TX/RX 线(模块 TX 接树莓派 RX，模块 RX 接树莓派 TX)。

硬件设计采用模块化思路，确保各个传感器单元可独立工作且便于维护。红外传感器和 WiFi 探针的组合应用保证了系统在精度和覆盖范围上的平衡。硬件连接采用标准 GPIO 接口方式，避免了复杂的外部电路设计，同时通过软件层面的算法弥补了硬件局限性。

### 系统设计架构

整体的三层架构设计如下图所示：



数据采集层由红外传感器和 WiFi 探针组成，前者负责精确计数，后者负责区域覆盖。

边缘端运行卡尔曼滤波算法对采集的原始数据进行初步噪声过滤和融合处理,将处理后的人流密度数据通过 HTTP 协议传输至服务器。

服务器层采用 Python FastAPI 框架构建 RESTful 风格 API,负责接收、存储和处理来自边缘设备的数据。同时运行 SARIMA 时间序列预测模型,分析历史数据并预测未来人流趋势。数据存储采用日期分片的 JSON 文件存储方式,兼顾了查询效率和存储成本。

应用展示层采用 HTML5+CSS3+JavaScript 技术栈开发的 Web 前端界面,通过实时热力图、趋势曲线图和预警系统多维度展示人流情况。界面设计遵循响应式原则,能够适配不同终端设备。

## 第 4 章 方案实现

### 卡尔曼滤波算法实现

本系统在边缘端实现了卡尔曼滤波算法,用于多传感器数据融合和噪声抑制。卡尔曼滤波器通过预测-更新两个核心步骤不断优化状态估计:预测步骤:根据系统模型预测下一时刻状态;更新步骤:结合实际测量值调整预测结果。

算法核心在于动态调整卡尔曼增益  $K$ ,在系统噪声和测量噪声之间取得平衡。对红外传感器和 WiFi 探针数据进行加权融合后,再通过卡尔曼滤波处理,有效提高了人流密度测量的准确性和稳定性。

在 `kalman_people_flow_density.py` 中的 `PeopleFlowEstimator` 类中的传感器融合逻辑体现了多源数据处理能力:基于方差动态调整红外传感器和 WiFi 探针的权重,并通过 `_dynamic_sensor_fusion` 方法实现智能权重分配。

### SARIMA 时间序列预测模型

服务器端实现了基于 SARIMA 的时间序列预测模型,其特点是能够同时处理趋势成分、季节性成分和随机成分,非常适合具有周期性变化的人流密度预测。模型通过分析历史数据中的时间相关性,能够预测未来 24 小时内的人流变化趋势。模型参数通过网络搜索和 AIC 准则自动优化,确保预测精度。

其源码核心在于 `density_predictor.py` 中 `find_best_parameters` 方法的实现,其通过网络搜索找到最佳模型参数,并依据 AIC 准则选择最优模型配置。找到最优参数后,即可通过基于 SARIMAX 的模型训练逻辑生成预训练好的模型,我们会使用 MSE、RMSE、MAE 和 MAPE 等指标评估模型性能,并进行序列化保存以供服务器的 HTTP 服务端使用。

### 分布式数据采集与存储

系统采用边缘计算与云端存储相结合的分布式架构,通过以下技术手段确保数据的高效处理和存储:通过在边缘节点的实时处理,原始数据进行预处理和初步分析,能够有效的减轻服务器的负担;只传输处理后的密度值而非原始数据,能够有效减少网络带宽消耗;热数据保存在服务器内存中提供快速查询,冷数据以日期为分片进行文件持久化存储;采用 JSON 格式进行数据交换和存储,较传统的数据库系统增添的跨平台兼容性。

## 可视化与预警系统

前端页面可视化提供了多维度的数据展示，包括：直观现实各区域当前人流密度值以及状态指示的实时密度指标；基于 Chart.js 实现的可交互时间序列图标，支持多时间快维度查询；展示最多 72 小时人流预测结果，能够帮助管理人员提前做好安排；基于 heatmap.js 实现了二位空间人流密度分布热图，直观展示人流聚集区域；根据预设阈值，对人流密度进行绿(安全)、黄(注意)、红(警戒)三级预警。

# 第 5 章 测试报告

## 系统性能测试

经过在实验室环境和真实场景的多轮测试，系统各项性能指标如下：

### 1. 测量精度评估：

红外传感器单通道计数准确率：96.8%（样本量：100 人次）

WiFi 探针覆盖范围内设备检测率：93.5%（样本量：50 设备）

融合算法处理后的人流密度估计准确率：95.2%（相比人工计数）

### 2. 系统响应时间：

边缘设备数据采集周期：实时（中断触发）

数据处理与上传延迟：≤1 秒

前端界面刷新延迟：≤2 秒

系统总体响应时间：≤3 秒

### 3. 预测模型评估：

短期预测（1 小时内）平均误差率：8.3%

中期预测（1-6 小时）平均误差率：12.7%

## 系统优化与改进

基于测试结果，我们对系统进行了以下优化：

调整卡尔曼滤波器参数，提高在极端人流密度条件下的稳定性

优化 SARIMA 模型训练流程，增加自动模型选择功能，提高预测准确率

改进前端界面加载速度，减少数据传输量，提升用户体验

增强系统日志功能，便于后续问题定位和分析

## 第 6 章 应用前景

### 实际应用场景

**智慧校园建设** 在大学图书馆、自习室等场所部署本系统，可实时监测学习空间使用情况，帮助学生查找空闲座位，提高学习资源利用效率。同时，通过人流预测功能，学校可优化图书馆开放时间和人员配置，在考试季等高峰期提前增加座位供应或延长开放时间。

**商业零售分析** 在商场、超市等零售场所，本系统能为经营者提供宝贵的客流数据和消费者行为分析。通过识别高人流密度区域和高峰时段，商家可优化商品陈列、调整人员排班并设计更有效的促销活动。同时，系统预测功能能够帮助零售商针对不同时段精准调配资源，提升运营效率和顾客满意度。

**交通枢纽管理** 在地铁站、火车站、机场等交通枢纽，本系统可用于实时监测旅客流量，预防高峰期拥堵风险。通过对历史数据的分析和预测，交通管理部门可提前调整安检通道数量、优化人员配置，甚至实施分时段进站措施，确保旅客安全和出行体验。

**智慧城市建设** 作为智慧城市基础设施的重要组成部分，本系统可与城市管理平台对接，为城市规划和公共资源配置提供数据支持。通过分析不同区域、不同时段的人流变化规律，城市管理能够更精准地规划公共空间布局、优化公共服务设施配置。

### 未来发展方向

**融合更多数据源** 计划与视频分析系统、环境监测设备等多元数据源进行整合，构建更全面的智能监测网络。

**深度学习预测模型** 将引入深度学习算法，结合循环神经网络 (RNN) 和长短期记忆网络 (LSTM) 等技术，进一步提升预测精度，尤其是对非常规事件影响下的人流变化预测能力。

**云边协同架构** 优化云边协同架构，提升边缘计算能力，减少对网络连接的依赖，同时保持云端强大的数据处理和分析能力。

**开放 API 生态** 构建开放 API 体系，允许第三方应用与本系统对接，形成更广泛的应用生态。

## 参考文献

- [1] 杨兆升,朱中.基于卡尔曼滤波理论的交通流量实时预测模型[J].中国公路学报,1999,(03):63-67.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.1999.03.009.
- [2] 陈国良,张言哲,汪云甲,等.WiFi-PDR 室内组合定位的无迹卡尔曼滤波算法[J].测绘学

报,2015,44(12):1314-1321.

[3] 聂佩林,余志,何兆成.基于约束卡尔曼滤波的短时交通流量组合预测模型[J].交通运输工程学报,2008,(05):86-90.

[4] 王莹,韩宝明,张琦,等.基于 SARIMA 模型的北京地铁进站客流量预测[J].交通运输系统工程与信息,2015,15(06):205-211.DOI:10.16097/j.cnki.1009-6744.2015.06.031.

[5] 李洁,彭其渊,杨宇翔.基于 SARIMA 模型的广珠城际铁路客流量预测[J].西南交通大学学报,2020,55(01):41-51.

[6] 李晓磊,肖进丽,刘明俊.基于 SARIMA 模型的船舶交通流量预测研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(02):329-332+337.