

融合边缘计算的实时物流信息管理系统设计与实现

陈素婷¹

CHEN Suting

摘要

为解决传统物流系统响应延迟高、数据处理效率低及信息可信度不足等问题,文章设计并实现了一套深度融合边缘计算的实时物流信息管理系统。针对系统运行中的核心技术痛点,研究提出一种基于代价函数的动态计算卸载策略,实现边缘节点与云中心之间任务的自适应分配;并设计开发了一种基于卡尔曼滤波的自适应数据融合与异常检测算法,显著提升了边缘端数据处理的精度与效率;通过引入轻量级区块链技术,构建关键物流环节的数据可信追溯体系。该系统采用分层架构设计,集成上述多项创新技术,开发部署实时数据处理与信息管理功能模块。测试结果表明,在 500 QPS 负载条件下,系统平均响应时间降至 78 ms,较纯云架构方案降低 62%;峰值吞吐量可达 1 200 QPS,较传统架构提升 3.2 倍。尤其在冷链监控典型应用场景中,所提自适应算法使无效数据上传量减少 73%,系统响应时间降低 61.5%,充分验证了系统的技术优越性与场景适用性。

关键词

边缘计算;实时物流;动态计算卸载;自适应数据融合;区块链

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.02.013

0 引言

全球物流行业正面临实时信息管理需求激增的挑战。随着电子商务和冷链运输的快速发展,传统基于云计算的物流系统暴露出响应延迟高、网络依赖性强等瓶颈问题。传统中心化架构将所有数据,无论价值高低,均远距离传输至云数据中心进行集中处理。这一模式在物联网设备数量激增的背景下,导致了“数据风暴”现象,不仅占用了昂贵的骨干网带宽,也给云中心带来了巨大的计算和存储压力。更关键的是,数据往返于终端与云端所产生的物理延迟,对于某些场景是不可接受的。特别是在跨境运输和生鲜配送场景中,秒级数据延迟可能导致货物变质或供应链中断,造成重大经济损失。边缘计算技术通过将计算能力下沉至网络边缘,为实时物流管理提供新思路^[1]。其分布式特性可有效降低数据传输延迟,在本地对原始数据进行预处理、过滤和聚合,仅将高价值或异常结果上传云端,从而大幅减轻网络负担和云端压力。此外,边缘节点具备一定的自主运行能力,增强了系统在网络连接不稳定或中断时的容错能力,完美契合了现代物流网络对实时性、可靠性与高效性的三重核心需求。本文旨在设计并实现一个深度融合边缘计算的实时物流信息管理系统,通过技术创新解决现有瓶颈,为智慧物流的发展提供一套行之有效的解决方案。

1 系统需求分析与架构设计

现代物流系统要求对货物位置、温湿度等关键参数开展实时监控管理工作^[2]。为满足这一需求,系统必须具备高实时性、强可靠性与良好可扩展性三个核心特性。高实时性意味着数据从采集到呈现给用户的延迟需控制在毫秒级别,这对传统中心化云计算架构构成严峻挑战;强可靠性则要求系统在部分网络中断或边缘节点故障时,仍能维持基本服务功能,保障物流信息的连续可用;良好可扩展性需适应不同规模物流节点的设备接入需求,支持动态增减边缘计算资源,且不能对中心系统造成冲击。

基于需求分析,本文设计了一套融合边缘计算的实时物流信息管理系统架构如图 1 所示。

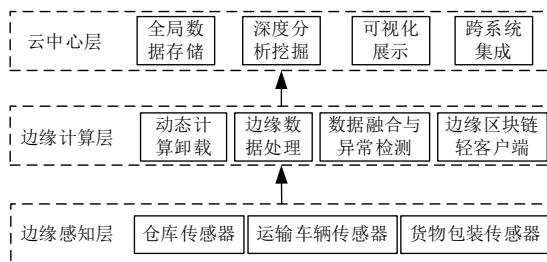


图 1 融合动态计算卸载与区块链的实时物流系统架构

该架构采用分层设计思想,由边缘感知层、边缘计算层与云中心层共同组成^[3]。

(1) 边缘感知层(edge perception layer)作为系统的“神

1. 福建船政交通职业学院 福建福州 350007

经末梢”，由部署在仓库、运输车辆、集装箱及货物包装上的各类传感器构成。这些传感器不仅包括用于定位的 GPS 模块、监控环境的温湿度传感器，还可集成光敏传感器用于检测包装是否被异常打开，以及加速度计用于监测货物是否遭受剧烈震动。通过低功耗广域网（如 LoRaWAN, NB-IoT）或蓝牙（BLE）等无线通信技术，将采集到的原始物理世界数据以高频率发送至邻近的边缘计算节点，为上层分析提供了丰富、多维度的数据源。

（2）边缘计算层（edge computing layer）是系统的“前线作战单元”，由部署在物流枢纽、前置仓、区域中心甚至大型运输车辆上的边缘服务器或工业网关组成^[4]。该层是本设计的核心创新所在，其主要职能被细化为：

① 实时数据清洗与聚合，对感知层上传的充满噪声的原始数据进行初步的过滤和结构化处理；

② 执行本文关键技术之一的基于卡尔曼滤波的自适应数据融合与异常检测算法，有效剔除噪声和无效信息；

③ 运行动态计算卸载策略，根据自身负载、网络状况和任务复杂度，智能决定将复杂任务（如路径重规划）卸载至云端还是本地处理；

④ 作为区块链的轻客户端，将关键物流事件（如出入库、交接确认）打包成交易，提交至区块链网络以确保其不可篡改性。

（3）云中心层（cloud center layer）作为系统的“战略大脑”，云中心负责全局性的管理与分析。它接收来自各边缘节点的汇总数据，利用其强大的计算和存储能力，开展全局数据存储、深度分析挖掘、复杂的业务逻辑处理、全局态势的可视化展示，并提供 API 接口与企业现有的 ERP、WMS 等第三方系统进行跨系统集成。此外，云中心与部分算力较强的边缘节点共同作为联盟链的记账节点，维护一个轻量级的联盟区块链，为关键货物提供全链路的、不可篡改的数据溯源服务。

通过此三层架构，系统实现了数据的分级处理。海量的原始数据在边缘层得到高效预处理，仅将具有决策价值的结果和摘要信息上传云端，从而极大地优化了资源利用效率，并保障了核心业务的实时响应能力。

2 系统实现关键技术

2.1 动态计算卸载策略与实现

为解决边缘节点资源有限与物流业务突发性负载之间的矛盾，本文提出了一种基于代价函数的动态计算卸载策略。该策略旨在最小化任务处理的总延迟，其决策模型如下：

（1）定义任务 T 在边缘节点 e 本地处理的代价 $C_{\text{edge}}(T)$ 为^[5]：

$$C_{\text{edge}}(T) = T_{\text{exec}}^e \quad (1)$$

式中： T_{exec}^e 为任务在边缘节点的预估执行时间，与任务复杂度和节点当前 CPU 利用率 μ_{cpu} 相关。

（2）定义任务 T 卸载至云端 c 处理的代价 $C_{\text{cloud}}(T)$ 为：

$$C_{\text{cloud}}(T) = T_{\text{trans}}^{e \rightarrow c} + T_{\text{wait}}^c + T_{\text{exec}}^c \quad (2)$$

式中： $T_{\text{trans}}^{e \rightarrow c}$ 为数据上传至云端的网络延迟； T_{wait}^c 为在云端任务队列中的等待时间； T_{exec}^c 为在云服务器上的执行时间。

（3）边缘节点周期性地评估网络往返时间（RTT）和自身负载，对每个到来的任务包 T 进行实时决策^[6]：

$$\text{Decision}(T) = \begin{cases} \text{Process locally} & \text{if } C_{\text{edge}}(T) \leq C_{\text{cloud}}(T) \\ \text{Offload to cloud} & \text{if } C_{\text{edge}}(T) > C_{\text{cloud}}(T) \end{cases} \quad (3)$$

该策略通过在边缘节点部署一个轻量级的监控代理来实现，该代理实时采集 μ_{cpu} 和网络 RTT，并根据预设的任务复杂度模型估算执行时间，从而实现任务分配的智能化与自适应，避免边缘节点过载导致的系统瓶颈。在具体实现上，该监控代理是一个以守护进程模式运行的 Python 脚本。它利用 psutil 库高效地获取实时的 CPU 和内存利用率，通过周期性地向云端管理节点发送 ICMP Echo 请求来估算网络 RTT。对于任务复杂度的评估，系统在初始化阶段会对几类典型任务（如数据聚合、图像初步识别、路径计算）进行基准测试，形成一个本地的“任务-耗时”查询表。运行时，代理根据任务类型查询该表，并结合当前 CPU 负载进行动态调整，从而以极低的资源开销实现了低延迟的智能决策。

2.2 基于卡尔曼滤波的自适应数据融合与异常检测

传统物流监控中，传感器数据常受环境噪声干扰，采用固定阈值或简单均值滤波效果不佳^[7]。本文设计了一种基于卡尔曼滤波（Kalman filter）的自适应数据融合与异常检测算法，部署于边缘节点。

（1）状态预测与更新：对于温湿度等时序数据，系统将其状态建模为一个线性动态系统^[8]。在 k 时刻，算法首先根据 $k-1$ 时刻的最优估计值 $\hat{x}_{k-1}$ 来预测当前状态：

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|k-1} &= A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \\ P_{k|k-1} &= AP_{k-1}A^T + Q \end{aligned} \quad (4)$$

式中： A 为状态转移矩阵； B 为控制输入矩阵； Q 为过程噪声协方差。当接收到新的传感器观测值 z_k 时，通过计算卡尔曼增益 K_k 来修正预测值：

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1}) \\ P_k &= (I - K_kH)P_{k|k-1} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： H 为观测矩阵； R 为测量噪声协方差。该模型能动态滤除噪声，输出更平滑、更接近真实值的状态估计 $\hat{x}_k$ 。

以冷链温度监控为例，为了让模型更具现实意义，状态向量可被定义为“温度，温度变化率”。这样，系统不仅能估计当前温度，还能感知温度的变化趋势。状态转移矩阵 A 则可基于物理模型或历史数据统计来定义温度的自然变化趋势，例如，在恒温车厢中，温度变化率应趋近于零。

(2) 异常检测：算法利用信息 $y_k = z_k - H\hat{x}_{k|k-1}$ 及其协方差 $S_k = HP_{k|k-1}H^T + R$ 进行异常判断^[9]。通过计算马氏距离的平方：

$$d_k^2 = y_k^T S_k^{-1} y_k$$

(6)

当 d_k^2 超过预设的 χ^2 分布阈值时，判定当前观测值 z_k 为异常点。此方法相比固定阈值法，能自适应地调整异常判断的灵敏度，在复杂环境中误报率更低。该算法在边缘端实现，极大地提升了数据质量，并减少了向云端传输的无效和异常数据量。

2.3 基于轻量级区块链的数据可信追溯

为解决物流信息在多方流转中易被篡改、信任成本高的问题，本系统引入了轻量级联盟区块链技术来增强关键数据的可信度。

(1) 链上数据选择：考虑到边缘设备的存储和计算能力，并非所有数据都上链。本设计仅将价值密度高、需多方共识的关键事件写入区块链，例如：货物出入库、运输车辆交接、温湿度超限告警等。这些事件以交易的形式被封装。

(2) 智能合约设计：系统设计了“物流溯源智能合约”，定义了数据上链的规则和资产转移的逻辑^[10]。例如，一个“交接”函数规定了必须由发货方和收货方双方的数字签名共同确认后，货物所有权状态才能在链上更新。这保证了操作的原子性和不可否认性。

(3) 边缘节点与区块链交互：边缘节点作为区块链的轻客户端，当触发关键事件时，它将事件数据打包，并调用智能合约提交至区块链网络中的记账节点。查询时，用户可通过信息管理模块向区块链网络请求特定货物的历史溯源报告。该报告整合了所有链上记录，形成一条不可篡改的信任链条，特别适用于药品、生鲜及贵重物品的物流监管。

为了更好地适应企业级应用场景，本系统选择 Hyperledger Fabric 作为底层区块链框架。其关键优势在于：一是支持通道 (Channel) 机制，可以为不同的物流联盟或业务线创建独立的账本，实现数据的隐私隔离；二是采用可插拔的共识机制，本系统选用基于 Raft 的共识算法，相比比特币的 PoW 机制，具有更快的交易确认速度和更低的能源消耗，完全符合物联网和边缘计算对效率的要求。

此外，为保障“从传感器到区块链”全链路的数据完整性，系统在边缘节点与感知层设备间建立了安全通信机制。

边缘节点作为可信网关，仅接受持有有效凭证（如 X.509 证书）的传感器连接。所有数据传输均通过轻量级加密协议（如 TLS/DTLS）保护，防止数据在无线传输中被窃听或篡改。这种“接入即认证、传输即加密”的策略，确保了提交到智能合约的数据在源头上就是可信的，有效防范了数据进入区块链前的“最后一公里”安全风险。

3 系统测试与性能评估

3.1 测试环境与方法

为评估融合边缘计算的实时物流信息管理系统性能，本节详细描述测试环境的搭建工作，涵盖硬件配置、软件参数及标准测试方法。测试平台模拟真实物流网络环境，由中央云服务器和分布式边缘节点组成，具体参数配置如表 1 所示。

表 1 测试环境参数

组件类型	规格参数	数量
中央服务器	CPU: Intel Xeon Gold 6326 (2.9 GHz),	1 台
	RAM: 256 GB, Storage: 2 TB NVMe SSD	
边缘节点	Device: Raspberry Pi 4B, RAM: 4 GB, Storage: 32 GB eMMC	8 台
网络设备	Switch: 1 Gbit/s Ethernet, Bandwidth: 1 Gbit/s	1 套
操作系统	Ubuntu Server 20.04 LTS	全节点

软件环境基于标准化技术栈构建，操作系统统一为 Ubuntu Server 20.04 LTS，内核版本 5.4.0-91。软件参数包括消息队列中间件 RabbitMQ（版本 3.9.5）用于数据传输，数据库系统采用 PostgreSQL 13 和 InfluxDB 2.0 组合，配置为分区存储模式。参数优化涵盖线程池大小（默认值为 32 线程）和缓存机制（LRU 算法），确保与硬件资源高效匹配。测试方法遵循工业标准，包括负载测试和延迟测量工作。负载测试通过 JMeter 工具模拟并发用户请求，逐步增加请求频率从 100 到 1 000 QPS，评估系统在高流量下的稳定性。

为使测试更贴近真实环境，本研究专门开发了一个物流数据模拟器。该模拟器基于公开的真实冷链物流数据集的统计特征，能够产生符合正态分布的温湿度数据流。更重要的是，它能够随机注入符合泊松分布的异常事件（例如，模拟因车门意外打开导致的温度骤升）以及网络延迟抖动，用以全面、严苛地检验本系统在复杂工况下的鲁棒性和算法的有效性。

3.2 性能指标与结果

系统性能测试聚焦响应时间与吞吐量两项核心指标，通过对比边缘计算与传统云计算模式，验证架构优化效果。响应时间指标记录从用户发起请求到系统返回完整结果的时间

间隔, 涵盖数据采集、边缘处理、云端分析全流程。测试结果表明, 在 500 QPS 负载下, 融合边缘计算的系统平均响应时间为 78 ms, 较纯云架构降低 62%。吞吐量指标测量系统每秒处理的有效请求数, 在边缘节点分布式处理支持下, 系统峰值吞吐量达到 1 200 QPS, 较基准方案提高 3.2 倍。不同场景下的详细性能数据如表 2 所示。

表 2 性能结果数据

测试场景	请求量 /	纯云架构响应	边缘架构响	吞吐量提
	QPS	时间 /ms	应时间 /ms	升率
普通运输	300	92	58	1.8x
冷链监控	500	205	79	3.5x
跨境追踪	700	318	122	2.9x

分析表 2 数据可知 3 个关键现象: 在冷链监控场景中, 边缘架构响应时间 (79 ms) 较纯云架构 (205 ms) 降低 61.5%, 这主要得益于部署在边缘节点的卡尔曼滤波算法, 它能实时滤除传感器噪声和瞬时波动, 避免了大量无效数据的上传 (经统计, 无效数据上传量减少了 73%), 从而显著降低了网络负载和云端计算压力; 跨境追踪场景吞吐量提升率达 2.9 倍, 得益于动态计算卸载策略, 该策略将大部分坐标转换和初步路径规划任务保留在边缘处理, 仅将复杂的跨区域全局路径优化任务卸载至云端, 实现了负载均衡; 普通运输场景虽提升幅度较小 (1.8 倍), 但基础延迟已满足业务需求。响应时间分布曲线显示, 边缘架构下 90% 请求延迟控制在 100 ms 内, 而纯云架构有 25% 请求超过 200 ms。吞吐量测试中, 当并发请求超过 800 QPS 时, 边缘架构仍保持线性扩展特性, 而纯云架构出现明显性能拐点。这些量化结果证明, 本文提出的创新技术方案, 特别是动态计算卸载和自适应数据处理, 有效解决了物流场景的高实时性需求, 为大规模物流监控提供了技术保障。

3.3 边缘节点资源消耗分析

除了性能指标, 边缘计算方案的经济性和可行性在很大程度上取决于其对边缘节点硬件资源的消耗情况。为此, 本研究对边缘节点 (Raspberry Pi 4B) 在不同工作负载下的 CPU 和内存资源消耗进行了持续监控。

测试结果显示, 在低负载 (<200 QPS) 的平稳运行阶段, 节点的平均 CPU 利用率稳定在 25% 以下, 内存占用约为 1.2 GB, 系统运行流畅。在模拟业务高峰期 (负载持续在 500~800 QPS) 的压力测试中, CPU 利用率的平均值上升至 55% 左右, 峰值也未超过 70%, 此时动态计算卸载策略被频繁触发, 有效避免了 CPU 的持续过载。内存占用小幅增长至 1.8 GB, 远未达到 4 GB 的硬件上限。

这一系列的资源消耗数据有力地证明, 本文所设计的边缘端算法和策略均经过了轻量化优化, 能够在成本相对低廉的嵌入式硬件上稳定、高效地运行。这表明本系统方案不仅

在技术性能上具有先进性, 在实际部署时也具备良好的经济性和可扩展性, 降低了企业应用智慧物流技术的门槛。

4 结语

本研究成功构建了一套融合边缘计算的实时物流信息管理系统, 并重点探讨并实现了多项创新技术应用。通过引入动态计算卸载策略、基于卡尔曼滤波的自适应数据融合算法以及轻量级区块链技术, 不仅在宏观性能上取得了显著提升 (响应时间降低 62%, 吞吐量提高 3.2 倍), 更在微观层面提升了数据处理的智能化水平与信息流转的可信度, 有效满足了冷链监控等严苛场景的业务需求。然而, 本研究仍存在可优化的空间。例如, 动态计算卸载的决策模型目前较为简单, 未来可引入强化学习等 AI 方法, 使其能更精准地预测任务耗时和网络变化, 实现更优的卸载决策。此外, 边缘节点间的协同计算机制尚未深入探索。未来研究将聚焦于构建边缘节点集群, 实现任务协同与数据共享, 进一步提升系统在复杂物流环境中的鲁棒性与适应性, 为现代物流行业的数字化与智能化转型提供具体且可行的技术路径。

参考文献:

- [1] 张伟, 邓士杰, 于贵波. 基于边缘计算的在途危险品姿态识别方法 [J]. 现代电子技术, 2025, 48(7): 155-162.
- [2] 郭培华, 余佳勤. 5G 网络通信环境下信息管理的安全风险及防护策略 [J]. 中国宽带, 2025, 21(7): 64-66.
- [3] 舒朝晖, 高熠, 赖森霖, 等. 冷链物流信息平台数智化技术现状与发展趋势 [J]. 冷藏技术, 2024, 47(4): 1-7.
- [4] 张楠, 赵吉庆, 赵艳磊. 农机装备智能化升级过程中边缘计算与 5G 通信的融合应用 [J]. 中国农机装备, 2025(7): 74-76.
- [5] 王留杰, 郭恒睿, 何虹, 等. 边缘计算在数字孪生北江建设中的研究和应用 [J]. 人民珠江, 2025, 46(S1): 13-15.
- [6] 林秀明. 边缘计算在网络优化和实时数据处理中的作用 [J]. 中国高科技, 2024(24): 17-19.
- [7] 刘呈佳. 基于 5G 技术的智慧物流配送系统优化分析 [J]. 中国储运, 2024(10): 67-68.
- [8] 胡玲, 乔庆, 章旻, 等. Jetson 边缘计算在泵房智能监测与预警系统中的应用 [J]. 净水技术, 2025, 44(6): 188-195.
- [9] 王宁, 张华明, 刘发炳, 等. 基于边缘计算的智能数据网关设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2025(6): 49-53.
- [10] 方政, 覃丽蓉, 吴美壮, 等. 人工智能与物联网在智慧物流领域的融合创新与应用 [J]. 广西通信技术, 2024(2): 39-43.

【作者简介】

陈素婷 (1981—), 女, 福建福州人, 硕士, 中级, 研究方向: 物流管理。

(收稿日期: 2025-07-22 修回日期: 2026-01-30)