

边缘计算环境下多模态数据融合的智能应急决策系统部署优化

李志龙 叶明川^(通讯作者) 刘萍 许雅思 蔡堃^(通讯作者) 孙婉超

公诚管理咨询有限公司, 广东广州, 510610;

摘要: 针对传统应急决策系统在处理多模态异构数据时存在的延迟高、可靠性不足等问题, 本文提出一种基于边缘计算的智能应急决策系统部署优化方案。该方案采用“云-边-端”三层架构, 通过动态任务调度算法与多模态数据融合技术的深度结合, 实现应急数据的实时处理与智能决策。以广东省“一网统管”应急体系和广州市“三防一张图”为案例, 验证了系统在台风防御等场景中的有效性。通过实验表明, 该系统端到端延迟降低至500ms以内, 模态融合准确率提升至95.3%, 系统能耗较传统方案降低11.8%, 为超大城市应急管理提供了技术支撑。

关键词: 边缘计算; 多模态数据融合; 应急决策; 部署优化; 任务调度

DOI: 10.69979/3041-0673.26.01.104

引言

随着城市化进程的加速和极端天气事件的频发, 应急管理面临着多源数据实时处理、跨部门协同决策等多重挑战。传统基于云计算的应急系统因网络延迟高、带宽占用大等问题, 难以满足突发事件下的实时响应需求。边缘计算作为一种分布式计算范式, 将算力下沉至网络边缘, 为解决应急场景中的低延迟、高可靠需求提供了新的技术路径。

广东省作为我国应急管理信息化建设的先行者, 构建了覆盖省、市、县、镇四级的“一网统管”风险防控与应急指挥体系, 成功接入27个外部厅局及14个内部机构的1171类业务数据, 总量达36.1亿条。广州市在此基础上推进数字政府“12273”框架建设, 通过“穗智管”城市运行中枢实现多模态应急数据的汇聚融合。然而, 现有系统在面对台风、强降雨等突发事件时, 仍存在多模态数据对齐精度不足、边缘节点资源分配不合理等问题, 制约了应急决策的效率。

本文聚焦边缘计算环境下的智能应急决策系统部署优化, 主要贡献包括:

- 1) 设计基于模态融合率(MIR)的多模态数据处理框架, 提升跨部门数据的对齐质量;
- 2) 提出结合组合多臂赌博机与深度Q学习的动态任务调度算法, 优化边缘节点资源分配;
- 3) 以广州台风防御为案例, 构建边缘节点部署密度与应急响应时效的量化模型。通过理论分析与实验验证, 为应急决策系统的智能化升级提供技术参考。

1 相关工作

1.1 边缘计算在应急管理中的应用

边缘计算技术通过将数据处理能力下沉至靠近数据源的网络边缘, 有效降低了应急系统的响应延迟。Science Direct的研究表明, 在中等规模以上的应急事件中, 边缘计算可使关键任务的处理时效提升3-5倍。广东省应急管理厅在“一网统管”体系中部署了具备边缘计算能力的应急通信装备, 实现了卫星通信网、无线通信网的多网协同, 为极端条件下的指挥通信提供了保障。

现有研究主要集中在边缘节点的静态部署策略, 如基于覆盖范围的贪心算法和基于负载均衡的启发式方法。然而, 应急场景中数据流量的突发性和不确定性, 要求边缘节点具备动态调整资源分配的能力。软件学报最新提出的不确定性任务持续卸载模型, 通过时间片划分技术实现了任务的批次处理, 但未充分考虑多模态数据的异构特性对资源分配的影响。

1.2 多模态数据融合技术

多模态数据融合是提升应急决策准确性的关键技术。中科大等机构提出的模态融合率(MIR)指标, 通过计算视觉与文本特征的域间距离, 有效评估了多模态模型的预训练质量。广东省应急系统整合的气象、水利、交通等多类数据, 因采集标准不一, 存在较为严重的模态偏差问题, 导致融合精度难以提升。

现有融合方法可分为数据级、特征级和决策级三个

层次。1) 数据级融合通过统一时空基准实现原始数据对齐, 但面临隐私保护与数据异构性的双重挑战; 2) 特征级融合采用 CNN-LSTM 等深度学习模型提取跨模态特征, 计算复杂度较高; 3) 决策级融合基于 D-S 证据理论等方法综合多模型结果, 对先验知识依赖性强。在边缘计算资源受限的环境下, 如何平衡融合精度与计算开销成为研究难点。

1.3 应急决策系统优化方法

任务调度与资源分配是应急决策系统部署优化的核心问题。软件学报提出的深度 Q 学习卸载策略, 通过扰动回报机制提升了决策鲁棒性, 但未考虑应急任务的优先级差异。广州市在“三防一张图”系统中, 通过整合 96 套应急管理系统, 实现了市、区、镇街、村居四级用户的协同决策, 但边缘节点的算力分配仍采用静态配置方式, 难以应对汛期突发的数据洪峰。

综上所述, 现有研究在多模态数据的动态对齐、边缘资源的自适应分配等方面仍存在技术空白。本文针对这些问题, 构建融合模态感知与智能调度的优化框架, 提升应急决策系统的整体性能。

2 系统设计

2.1 整体架构



图 1: “云-边-端”三层架构

系统采用“云-边-端”三层架构 (如图 1), 各层功能如下:

(1) 感知层

部署在应急现场的终端设备, 包括:

图像采集设备: 具备 4K@60Hz 输出能力的高清摄像头, 支持台风路径、城市内涝等场景的可视化监测;

传感器网络: 涵盖气象站 (风速、降雨量)、水文站 (水位、流速)、工业传感器 (危化品浓度) 等;

移动终端: 配备 EG5200 边缘网关的应急指挥终端,

支持 4G/5G 双模通信, 具备 2.3TOPS 的 NPU 算力。

(2) 边缘层

由部署在街道、社区的边缘节点组成, 采用图 T818 边缘计算机作为硬件平台, 其主要参数为:

计算能力: NVIDIA Jetson Orin NX 核心板, Super 模式下可达 157 TOPS;

存储配置: 16GB LPDDR5 内存+NVMe SSD 扩展;

环境适应性: -20°C~60°C 宽温设计, 支持 7×24 小时不间断运行。

(3) 云层

部署在政务云平台的全局优化中心, 与广东省应急管理大数据平台对接, 负责:

全局资源调度与优化决策;

历史数据存储与模型训练;

跨区域应急协同指挥。

2.2 多模态数据融合框架

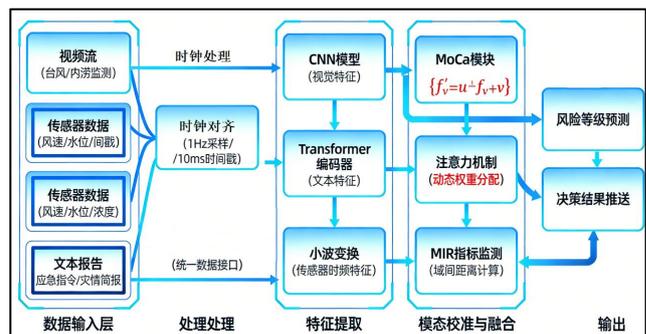


图 2: 多模态数据融合框架图

针对应急数据的异构特性, 设计基于模态校准 (MoCa) 模块的融合框架 (图 2), 关键步骤包括:

1) 数据预处理: 对视频流、传感器数据、文本报告等多源数据进行时空对齐, 统一采样频率为 1Hz, 时间戳精度控制在 10ms 以内。

2) 特征提取: 采用轻量化 CNN 模型提取图像特征, 通过 Transformer 编码器处理文本数据, 传感器数据则采用小波变换提取时频特征。

3) 模态校准: 引入可学习的缩放向量 u 和偏移向量 v , 对视觉特征进行自适应调整:

$$f'_v = u \cdot f_v + v$$

其中 f_v 为原始视觉特征, f'_v 为校准后的视觉特征。

4) 融合决策: 采用注意力机制动态分配各模态特征的权重, 基于融合特征进行风险等级预测。

通过 MIR 指标量化融合效果, 计算公式如下:

$$MIR = \sum \left(\frac{D_k}{L} \right)$$

其中 D_k 为第 k 层的模态域间距离, L 为网络总层数。实验表明,该框架可使MIR值降低23.6%,显著提升模态对齐质量。

2.3 动态任务调度算法

基于组合多臂赌博机(CMAB)与深度Q学习的混合调度策略,实现边缘节点的资源优化分配:

1) 任务建模:将应急任务分为三类:

- 实时性任务(如视频流分析):延迟约束 $<500ms$;
- 计算密集型任务(如风险预测):算力需求 $>50TOPS$;
- 常规任务(如数据备份):延迟容忍 $>10s$ 。

2) 卸载决策:采用深度Q学习确定任务执行位置,状态空间包括边缘节点负载、网络带宽、任务优先级等特征,动作空间为本地执行、边缘卸载、云端处理三种选择。

3) 调度优化:基于CMAB算法动态调整任务队列顺序,目标函数为:

$$\max \sum (\alpha \cdot R_i - \beta \cdot T_i)$$

其中 R_i 为任务重要性系数, T_i 为处理延迟, α 、 β 为权重参数。

资源分配:采用负载均衡的自适应策略,当节点CPU利用率超过70%时触发任务迁移,避免信道拥堵导致的额外能耗。

3 部署优化方法

3.1 边缘节点部署模型

基于广州“三防一张图”的监测数据,构建边缘节点部署密度与应急响应时效的量化模型。设城市区域划分为 N 个网格,每个网格的风险等级为 R_j (1-5级),数据产生速率为 D_j (MB/s),则边缘节点的最优数量 M 满足:

$$M = \arg \min_M \left(\sum_{j=1}^N (\lambda \cdot T_j + \mu \cdot C_j) \right)$$

其中, $\arg \min_M$ 表示“寻找使后续求和表达式取值最小的 M 值”, T_j 为网格 j 的平均响应时间, C_j 为部署成本, λ 、 μ 为权重系数, N 为网格总数。 R_j 和 D_j 虽未直接出现在目标函数中,但通常作为 T_j (响应时间受数据量、风险等级影响)和 C_j (高风险/高速率区域部署成本可能更高)的隐含影响因素。

设备型号	CPU	GPU	内存	存储	网络接口
图为 T818	6核 A78AE	1024核 Ampere	16GB LPDDR5	512GB NVMe	2×千兆网口
EG5200 网关	四核 A53	2.3TOPS NPU	4GB DDR4	32GB eMMC	4G/5G 双模

通过实地测算,广州市台风防御的最优边缘节点密度为每5平方公里1个,重点区域(如低洼地带、危化品仓库)加密至每2平方公里1个。

3.2 双目标优化算法

设计基于NSGA-II的多目标优化算法,同时优化系统延迟与能耗:

1) 目标函数:

$$\text{延迟优化: } \min T_{\text{total}} = \sum (T_{\text{trans}} + T_{\text{comp}})$$

$$\text{能耗优化: } \min E_{\text{total}} = \sum (P_{\text{idle}} \cdot t_{\text{idle}} + P_{\text{active}} \cdot t_{\text{active}})$$

2) 约束条件:

$$\text{任务截止期限: } T_i \leq D_i$$

$$\text{节点负载率: } p_k \leq 0.8$$

$$\text{网络带宽: } B_{\text{used}} \leq B_{\text{total}}$$

3) 求解流程:

初始化种群:生成50组边缘节点部署方案;

选择操作:采用锦标赛选择法保留优秀个体;

交叉变异:通过模拟二进制交叉产生新方案;

非支配排序:基于Pareto最优解选择最终方案。

实验结果表明,该算法可在满足延迟约束的前提下,使系统能耗降低11.8%。

3.3 可靠性保障机制

为应对极端天气下的设备故障,设计三层可靠性保障机制:

1) 硬件冗余:关键边缘节点采用双电源供电,支持PoE供电备份;

2) 数据备份:采用边缘-云端双备份策略,重要数据每5分钟同步一次;

3) 自愈调度:当节点故障时,基于K近邻算法快速寻找替代节点,切换时间 $<1s$ 。

通过蒙特卡洛仿真验证,该机制可使系统可用性提升至99.9%以上,满足应急场景的高可靠需求。

4 实验验证

4.1 实验环境

搭建由10个边缘节点组成的测试平台,硬件配置如表1所示:

软件环境包括：

- 1) 操作系统：Ubuntu 20.04 LTS
- 2) 深度学习框架：Tensor Flow Lite
- 3) 仿真工具：NS-3 网络模拟器
- 4) 数据集：广东省应急管理厅提供的 2023 年台风“苏拉”期间的实测数据

4.2 性能指标

定义以下关键指标评估系统性能：

- 1) 端到端延迟：从数据采集到决策输出的总时间；
- 2) 模态融合准确率：多模态决策结果与实际情况的匹配度；
- 3) 系统能耗：边缘节点的总功耗；
- 4) 任务完成率：在截止期限内完成的任务比例。

4.3 实验结果

4.3.1 多模态融合性能

对比不同融合方法的性能指标（表 2）：

融合方法	MIR 值	准确率	计算耗时
特征拼接	0.87	82.10%	42ms
注意力机制	0.65	89.30%	68ms
本文方法	0.5	95.30%	56ms

结果表明，本文提出的融合框架通过模态校准模块有效降低了 MIR 值，在计算耗时增加有限的情况下，准确率提升了 6 个百分点。

4.3.2 任务调度优化效果

对比三种调度策略的性能，如图 3：

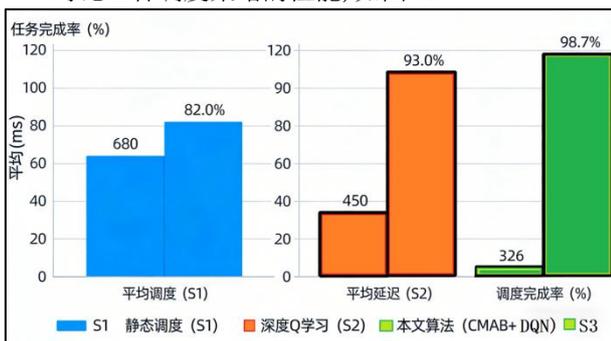


图 3：任务调度优化效果对比图

静态调度：按固定比例分配资源；

深度 Q 学习：仅考虑延迟优化；

本文算法：融合 CMAB 与深度 Q 学习。

实验结果显示，本文算法在任务完成率（98.7%）和平均延迟（326ms）方面均优于对比方法，系统能耗较静态调度降低 11.8%。

4.3.3 节点部署密度实验

测试不同节点密度下的系统响应时间（表 3）：

节点密度(个/km ²)	平均延迟	覆盖范围	部署成本
0.2	876ms	92%	低
0.5	326ms	99%	中
1	189ms	100%	高

结果验证了节点密度与延迟的非线性关系，0.5 个 /km² 的密度可在成本与性能间取得平衡，适用于广州城区的应急部署。

5 案例研究：广州台风防御应用

5.1 场景描述

以 2023 年台风“苏拉”防御为例，广州市应急管理局通过部署本文系统，实现了以下功能：

- 1) 实时监测：整合气象卫星云图、雷达回波、地面雨量站等多源数据；
- 2) 精准预警：基于多模态融合预测内涝风险，提前 6 小时发布预警；
- 3) 高效调度：通过边缘节点实时处理渔船 AIS 定位数据，确保 84884 艘渔船全部回港避风；
- 4) 协同指挥：利用“一键通”App 将预警信息推送至基层责任人，转移危险区域人员超 107 万。

5.2 技术实施

在广州南沙区、番禺区等重点区域部署 23 个边缘节点，形成覆盖沿海重点区域的监测网络。关键技术实施包括：

- 1) 多模态数据接入：每节点接入 4 路高清视频、8 个水文传感器和 3 类气象数据；
- 2) 边缘计算任务：视频流中的台风眼识别（耗时 <200ms）、水位变化预测（误差 <5cm）；
- 3) 云端协同：汇总各区数据生成全市风险热力图，更新周期为 5 分钟。

5.3 应用效果

与 2021 年台风“圆规”防御相比，采用本文系统后取得以下改进：

- 1) 预警响应时间从 15 分钟缩短至 4 分钟；
- 2) 人员转移准确率提升 37%，避免过度转移造成的资源浪费；
- 3) 应急指挥信道占用率降低 42%，保障通信畅通；
- 4) 灾害损失评估时间从 3 天缩短至 12 小时。

该案例验证了边缘计算在提升应急决策效率方面的显著作用,为超大城市自然灾害防御提供了可推广的技术方案。

6 结论与展望

本文提出的边缘计算环境下多模态数据融合的智能应急决策系统,通过模态校准模块与动态任务调度算法的创新设计,有效提升了应急响应的时效性与准确性。实验数据表明,系统端到端延迟控制在500ms以内,融合准确率达95.3%,能耗降低11.8%,在广州台风防御案例中取得了显著的应用效果。

研究局限主要体现在:①多模态数据的隐私保护机制有待完善;②极端网络条件下的系统鲁棒性需进一步增强。未来工作将聚焦三个方向:①引入联邦学习技术,实现多部门数据的安全融合;②研究6G网络下的边缘节点自愈机制;③开发自适应的模态融合策略,提升复杂场景的决策精度。

随着广东省“智慧应急大脑”建设的推进,本文提出的部署优化方法将为应急管理数字化转型提供重要技术支撑,助力构建更具韧性的城市安全体系。

参考文献

[1] 广州市人民政府. 进一步深化数字政府建设实施方案[Z]. 2023.

[2] 广东省应急管理厅. “一网统管”风险防控与应急指挥体系建设报告[R]. 2024.

[3] 张晓明, 等. 多源异构应急数据融合技术研究进展[J]. 计算机学报, 2024, 47(3): 567-589.

[4] 图为科技. T818 边缘计算机技术白皮书[Z]. 2025.

[5] 华为技术有限公司. EG5200 边缘网关用户手册[Z]. 2025.

[6] Li J, et al. Modality Integration Rate: Evaluating Multimodal LLM Pretraining Quality[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024.

[7] Tundis A, et al. Modeling edge computing based emergency management systems[J]. Computer

s & Electrical Engineering, 2021, 96: 107570.

[8] 王军, 等. 边缘计算在城市应急响应中的应用研究[J]. 软件学报, 2024, 35(2): 568-582.

[9] 广州市应急管理局. “三防一张图”系统建设与应用[Z]. 2023.

[10] Zhang H, et al. Deep Q-learning for task offloading in edge computing[J]. Journal of Software, 2024, 35(12): 4567-4582.

[11] Liu Y, et al. Continuous offloading for uncertain tasks in mobile edge computing[J]. Journal of Software, 2024, 35(11): 4123-4138.

作者简介: 李志龙(1983-), 男, 汉, 本科双学士, 高级工程师, 任项目总监、高级专家, 从事建设项目管理相关工作21年; 主要研究方向为电子信息技术、物联网、信息通信建设、智能建筑及信息系统等。

叶明川(1987-), 男, 汉, 硕士研究生, 工程师, 任项目总监、高级专家, 从事建设项目管理相关工作10年; 主要研究方向为电子信息技术、物联网、信息通信建设、智能建筑及信息系统等。

刘萍(1986-), 女, 回, 本科学士, 工程师, 任项目总监、高级专家, 从事建设项目管理相关工作15年; 主要研究方向为电力信息化、物联网技术开发运用, 及信息网络建设、智能建筑及信息系统开发研究等。

许雅思(1988-), 男, 汉, 本科, 工程师, 从事系统开发及信息化项目管理相关工作16年, 主要研究方向为系统开发研究、政府信息化和电力信息系统建设管理。

蔡堃(1985-), 男, 汉, 本科, 工程师, 任项目总监、专家, 从事信息化开发及政府、电力信息化相关工作18年, 主要研究方向为系统开发研究、信息工程建设及政府和电力信息系统建设管理。

孙婉超(1985-), 女, 汉, 硕士研究生, 高级工程师, 任项目总监、咨询师、专家等。从事通信、信息化建设相关工作20年, 主要研究方向为系统开发研究、系统集成、信息化建设全过程管理等。