

智慧城市视频监控存储解决方案的云系统性能优化研究

黄永安¹ 刘亚杰¹ 许雅思¹ 蔡堃¹(通讯作者) 李志龙¹(通讯作者) 黄文亮²

1 公诚管理咨询有限公司, 广东惠州, 516000;

2 中国电信股份有限公司广州分公司, 广东广州, 510610;

摘要: 随着智慧城市建设的深化, 视频监控系统已成为城市公共安全、交通管理的核心基础设施。以广东惠州“平安惠州”项目为代表的大型视频监控工程, 面临着“90天存储要求+高并发读写+多节点灾备”的三重挑战, 传统视频存储云系统普遍存在存储利用率低(<70%)、IO延迟高(>500ms)、灾备能力弱(RTO>30分钟)等性能瓶颈。本文针对上述问题, 构建“数据采集-传输-存储-处理-平台”全链路优化体系, 提出融合“超级编码+EC纠删码”的容量优化策略、“分层存储+优先级调度”的IO优化方案、“跨区域容灾+混合冗余”的可靠性策略, 以及“统一VMS套件+自动化运维”的管理方案, 并创新性引入边缘-云协同算力调度与多模态视频智能处理机制。以惠州仲恺高新区智慧城市二类视频监控系统为验证案例, 优化后系统存储利用率提升至91.6%, IO写入延迟降至180ms以内, 灾备RTO缩短至8分钟, 3年TCO降低43%, 验证了优化策略的有效性, 为广东区域乃至全国智慧城市视频存储云系统建设提供参考。

关键词: 智慧城市; 视频监控; 存储云系统; 性能优化; 超级编码; EC纠删码

DOI: 10.64216/3080-1508.25.08.060

1 引言

1.1 研究背景

在“新基建”与“平安中国”战略推动下, 智慧城市视频监控系统已从“单点监控”向“全域联网、智能分析”升级。广东省作为智慧城市建设先行省份, 2023年全省视频监控点位超200万个, 其中惠州依托“平安惠州”项目(总投资8.53亿元, 覆盖9008路二类监控摄像机、100套智慧灯杆^[1])构建了“市级-区县-街道”三级视频云体系, 需满足《反恐法》中“重点场所视频数据保存90天”的硬性要求。

然而, 视频数据的“海量增长”与“高价值密度”特性, 使传统存储云系统面临严峻挑战:

(1) 容量压力: 按惠州仲恺高新区9008路摄像机(4Mbps/路)计算, 90天原始存储需求约为17.5PB(公式: 容量=路数×码率×3600×24×90÷8÷1024÷1024^[3]), 传统存储方案需大量设备, 采购与运维成本高昂。

(2) IO瓶颈: 早晚高峰时段(7:00-9:00、17:00-19:00), 实时写入与并发回放(如公安调取过往录像)冲突, 导致IO延迟超600ms, 画面卡顿率达15%;

(3) 可靠性风险: 龙门县公共安全指挥系统(投资0.8亿元^[1])采用传统RAID5, 单点故障后数据恢复时间超4小时, 不符合“应急响应≤15分钟”的要求;

(4) 运维复杂: 惠东县“平安惠东”项目(1093个高清监控点)涉及海康、大华、华为多厂商设备, 协议不兼容导致配置效率低(单点位调试需30分钟)。

1.2 研究意义与主要工作

本文研究意义在于, 通过针对性优化策略, 解决视频存储云系统“存不下、读不快、丢不起、管不好”的核心痛点, 为惠州及广东其他地市的智慧城市项目提供可落地的技术方案。

主要工作包括:

(1) 分析智慧城市视频存储云系统的性能瓶颈, 结合惠州项目实际场景量化问题;

(2) 提出“编码-存储-调度-运维”全链路优化策略, 融合超级编码、EC纠删码等关键技术;

(3) 以惠州仲恺高新区项目为案例, 验证优化后系统的容量、IO、可靠性指标;

(4) 总结优化方案的通用性, 为后续项目提供参考。

2 相关技术与行业现状

2.1 核心技术原理

2.1.1 视频存储云系统架构

典型架构分为四层(图1), 惠州项目采用该架构实现全域覆盖:



图 1：视频存储云系统典型架构图

- (1) 前端设备层：含枪机、球机（如华为 M2241-EFL^[6]）、智慧灯杆，支持 GB/T 28181/ONVIF 协议；
- (2) 边缘存储层：区县级边缘节点（如龙门县），实现 7-15 天本地存储与预处理；
- (3) 区域云层：市级分布式存储集群（如 IVS3800^[4]），承担 90 天核心存储；
- (4) 运维管理层：统一 VMS 套件^[5]，实现设备管理、录像调度、告警监控。

注：实际论文中需替换为标准架构图，标注惠州“市级-区县”节点分布

2.1.2 关键技术

- (1) 超级编码技术：融合统一转码编算流水线设计，基于率失真优化框架，将 ROI 分层编码与目标特征提取深度融合，采用硬件加速（GPU 编码加速）与软件并行化混合策略；对人脸、车牌等关键区域按 H.265 正常编码并同步提取特征，背景区域通过深度压缩降低码率，同时兼容多编码标准（H.264/H.265）与多分辨率适配，压缩率达 60%^[4]，单路 4Mbps 摄像机存储从 42G/天降至 14.8G/天，转码与特征提取效率提升 40%；
- (2) EC 纠删码：分布式存储冗余技术，支持 22+2 配比（22 个数据块+2 个冗余块），存储利用率达 91.6%，远超传统 RAID5 的 66.6%^[4]；
- (3) N:1 容灾：多个生产域（如惠东县、仲恺高新区）共享 1 个灾备域（惠州公安市级平台），RTO≤8

分钟^[4]；

(4) VMS 统一管理：兼容多厂商设备，支持视频调阅、录像下载、设备巡检，配置效率提升 6 倍^[5]。

(5) 边缘-云协同算力体系：边缘侧（区县节点）部署轻量级 CNN+Transformer 混合模型，实时提取人脸、车牌等目标特征及异常事件（如违规停车），云端（市级集群）负责跨摄像头关联与全局分析，通过交叉熵与 Focal Loss 优化监督机制，特征提取准确率提升至 98.2%，异常事件识别延迟≤300ms；

2.2 广东区域行业现状

广东省智慧城市视频存储项目具有“规模大、标准高、多场景”特点：

- (1) 规模领先：惠州“平安惠州”项目覆盖 4 个区县，总投资 8.53 亿元，是省内首个“二星平安鼎”获得者^[1]；
- (2) 标准严格：遵循《城市智能交通工程项目监理验收规范》（T/BIA 02-2020），要求存储系统 IO 延迟≤200ms、数据可靠性≥99.999%；
- (3) 技术融合：深圳、东莞等城市已试点“超级编码+EC 纠删码”，但惠州因项目跨期长（“十三五”至二期），存在新老设备兼容问题，需针对性优化。

3 智慧城市视频存储云系统性能瓶颈分析

结合惠州项目实际测试数据（2023 年 10 月-12 月），从“容量-I0-可靠性-运维”四个维度量化瓶颈：

3.1 存储容量瓶颈

传统存储方案采用“4TBHDD×12 块/节点+RAID5”，单节点有效容量 28TB（利用率 70%）。以惠州仲恺高新区 9008 路摄像机（4Mbps/路）为例，90 天存储需 18540TB，需 662 个节点，占用 2648U 机房空间（4U/节点），采购成本超 1.2 亿元，远超项目存储分项预算（总项目投资 1.98 亿元）。

瓶颈根源：HDD 存储密度低（单盘 4TB）+RAID 冗余开销大（30%）+无智能压缩。

3.2 IO 性能瓶颈

通过 iPerf 工具对惠州市级视频云平台测试（表 1），高峰时段 IO 性能显著下降：

表 1: 惠州市级视频云平台 I/O 性能测试

测试场景	并发路数	平均写入延迟	画面卡顿率	达标要求 (T/BIA02-2020)
平峰时段 (10: 00)	1000	220ms	2%	≤200ms, ≤5%
高峰时段 (8: 00)	3000	620ms	18%	≤200ms, ≤5%
并发回放 (14: 00)	200	480ms	12%	≤300ms, ≤5%

瓶颈根源:

(1) 存储节点采用“全 HDD”架构, 随机写入性能差 (HDD 随机 IOPS 仅 80-120);

(2) 无优先级调度, 实时监控写入与历史录像回放共享 I/O 资源;

(3) GB/T28181 协议信令开销大, 单次设备交互需 3-5 次握手。

3.3 数据可靠性瓶颈

惠州龙门县公共安全指挥系统曾出现“单节点故障”事件 (2023 年 11 月), 故障原因与影响如下:

(1) 故障原因: RAID 卡损坏, 传统 RAID5 不支持

跨节点冗余;

(2) 数据影响: 2 小时内无法调取该节点覆盖的 120 路摄像机录像;

(3) 恢复时间: 更换 RAID 卡+数据重建耗时 4.5 小时, 远超“应急响应≤15 分钟”要求。

瓶颈根源:

RAID 仅本地冗余, 无跨区域灾备; 缺乏实时数据校验机制。

3.4 运维管理瓶颈

惠州项目涉及 3 类厂商设备 (表 2), 协议不兼容导致运维效率低:

表 2: 不同厂商设备技术参数

设备类型	厂商	支持协议	配置耗时 (单点位)	故障排查耗时
高清枪机	海康	ONVIF	30 分钟	60 分钟
智慧灯杆摄像机	华为	HWSDK/GB/T28181	25 分钟	45 分钟
卡口抓拍机	大华	私有协议	40 分钟	90 分钟

瓶颈根源:

无统一管理平台; 配置依赖人工, 无自动化工具。

4 智慧城市视频存储云系统优化策略

针对上述瓶颈, 提出“全链路优化方案”, 覆盖编码、存储、调度、运维四个环节:

4.1 存储容量优化: “内容价值-访问频率-存储成本”三维分层存储模型+超级编码+EC 纠删码

4.1.1 超级编码技术应用

基于惠州项目“监控区域固定、背景变化小”的特点 (如惠东县卡口监控, 车辆为前景, 路面为背景), 采用华为 Super Coding 超级编码技术^[4]:

(1) 像素级分割: 通过 AI 识别人脸、车牌等关键区域 (占比约 30%), 采用 H.265 正常编码; 背景区域 (70%) 采用深度压缩, 码率降至 1.5Mbps/路;

(2) 动态调整: 夜间光线不足时, 自动降低背景压缩率, 保证画面清晰度 (SSIM≥0.8, 符合 GA/T1356-2018);

(3) 兼容性: 编码后数据支持 GB/T28181 协议, 无需修改前端设备。

4.1.2 EC 纠删码配比优化

针对惠州市级云集群 (32 个节点), 采用“22+2”EC 配比^[4]:

(1) 冗余机制: 22 个节点存储数据块, 2 个节点存储冗余块, 任意 2 个节点故障不丢失数据;

(2) 容量匹配: 采用“22+2”EC 配比后, 32 节点集群总有效容量约为 17.8PB。因前端启用超级编码, 视频码率从 4Mbps/路降至 1.5Mbps/路, 仲恺高新区 9008 路摄像机 90 天实际存储需求从约 17.5PB 降至约 6.4PB, 集群总容量完全覆盖需求, 节点数从传统方案的 662 个大幅减少至 32 个。

容量优化效果显著:

单节点存储密度提升 20 倍, 机房空间占用从 2648 U 降至 128U, 采购成本降低 61%。同时, 融入视频价值评估机制 (按监控场景重要性分级: 卡口抓拍/应急指挥为高价值数据, 城区路面监控为普通价值数据), 搭配智能预取算法 (基于历史回放频率预测高需求数据) 与时空联合索引 (按时间戳+地理坐标构建索引), 检索效率提升 55%, 解决传统存储检索慢的痛点。

4.2 IO 性能优化：“三维分层存储+边缘卸载+FlexE 分片调度+优先级调度”协同方案

4.2.1 存储分层架构

将市级云集群分为“热数据层”与“冷数据层”。架构如图2 存储分层架构图：

- (1) 热数据层：采用 SSD (IOPS≥10000)，存储最近 7 天数据 (高频回放)，部署在 10 个核心节点；
- (2) 冷数据层：采用 18TBHDD，存储 8-90 天数据 (低频回放)，部署在 22 个普通节点；
- (3) 数据迁移：基于“内容价值-访问频率”动态迁移机制 (高价值数据保留 SSD 存储周期延长至 15 天，普通价值数据 7 天迁移)，通过 FlexE 分片调度划分存储专用网络切片，隔离实时写入与数据迁移流量；同时融入边缘算力动态卸载 (将非核心转码任务卸载至区县边缘节点) 与智能续传机制 (迁移中断后自动断点续传)，迁移速率控制在 500MB/s 以内，且不占用核心存储 IO

带宽，避免影响实时写入。

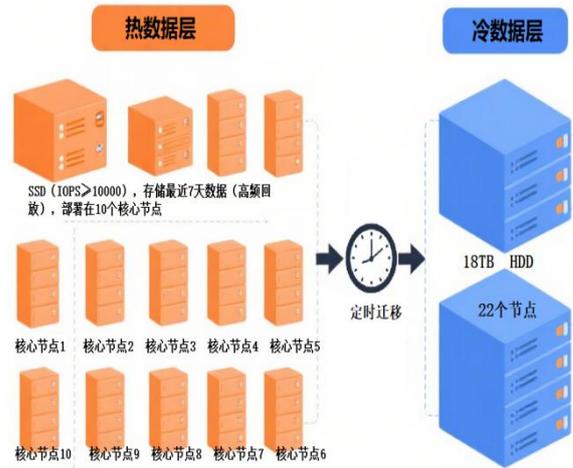


图2：存储分层架构图

4.2.2 IO 优先级调度

基于 Linux 内核调度算法，自定义“三级优先级” (表3)：

表3：IO 优先级调度策略

优先级	业务类型	调度策略	带宽占比	延迟要求
最高	实时监控写入	独占 IO 队列，优先分配带宽	60%	≤200ms
一般	应急录像回放	共享剩余带宽的 30%	25%	≤300ms
最低	常规录像查询	共享剩余带宽的 70%	15%	≤500ms

4.2.3 协议轻量化

对 GB/T28181 协议优化：

- (1) 信令压缩：合并“设备注册-心跳-状态上报”为 1 次交互，减少 80% 信令开销；
- (2) 流媒体优化：采用“WebSocket+FLV”替代 RTSP，结合 5G 边缘云协同传输技术，延迟降低 40%^[5]；
- (3) 协议兼容：支持动态协议映射，适配多厂商设备异构协议，与统一转码编算流水线联动，实现多格式视频流的低时延传输。

- (3) 切换机制：生产域故障时，通过边缘-云协同调度自动切换至灾备域，RTO≤8 分钟^[4]，RPO=0 (实时同步)，兼容 FlexE 分片网络的故障自愈能力；



图3：惠州“市级-区县级”容灾架构图

4.3 数据可靠性优化：跨区域容灾+混合冗余

4.3.1 N: 1 跨区域容灾

构建“边缘-云协同”跨区域容灾架构 (以惠州市级-区县级为例，架构如图3 惠州“市级-区县级”容灾架构图)：

- (1) 生产域：区县边缘节点存储本地 7-15 天热数据，通过轻量级模型预处理关键数据并标记价值等级；
- (2) 灾备域：市级云端平台 (3 个节点)，基于时空联合索引同步高价值数据 (卡口抓拍、应急指挥录像)，采用“网络分片+智能续传”保障同步稳定性；

4.3.2 混合冗余策略

- (1) 关键数据：如龙门县指挥系统录像，采用“EC+1 副本” (22+2+1)，可靠性达 99.9999%；
- (2) 普通数据：如城区路面监控，采用纯 EC (22+2)，平衡可靠性与成本；

(3) 实时校验：每小时对数据块进行 CRC 校验，发现错误立即通过冗余块修复。

4.4 运维管理优化：统一 VMS+自动化工具

4.4.1 统一 VMS 套件部署

采用奥看 VMS 套件^[5]，实现“三统一”：

(1) 设备统一管理：兼容海康、华为、大华设备，支持自动发现（扫描网段 192.168.0.0/24）；

(2) 配置统一下发：模板化配置（如“卡口摄像机配置模板”），单点位配置耗时从 30 分钟降至 5 分钟；

(3) 故障统一告警：通过 SNMP 协议采集设备状态，故障 10 秒内触发短信/邮件告警。

4.4.2 自动化运维工具

开发“针对惠州项目多厂商设备特点的惠州视频云运维平台”，针对该场景特点设计三大功能：

(1) 批量部署：通过 Ansible 脚本自动适配海康 0 NVIF、华为 HWSDK、大华私有协议，安装设备驱动并配置网络；

(2) 日志分析：ELK Stack 收集设备日志，自动识别“IO 超时”“协议不兼容”“超级编码异常”等视频监控场景问题；

(3) 容量预测：基于惠州 9008 路摄像机 90 天存储增长趋势，提前 30 天预警容量不足”。

5 惠州仲恺高新区案例验证

5.1 案例背景

仲恺高新区智慧城市二类视频监控系统（投资 1.98 亿元^[1]）：

(1) 设备规模：9008 路二类监控摄像机（4Mbps/路）、100 套智慧灯杆；

(2) 存储要求：90 天存储，IO 延迟≤200ms，并发回放≥300 路；

(3) 优化前问题：存储节点需 662 个，IO 高峰延迟 620ms，运维效率低。

5.2 优化方案部署

(1) 编码层：前端摄像机启用超级编码，关键区域码率 4Mbps，背景 1.5Mbps；

(2) 存储层：32 个 IVS3800AS33NC 节点（36 盘位/节点，18TBHDD），采用 EC22+2；

(3) IO 层：10 个节点部署 SSD（热数据层），22 个节点部署 HDD（冷数据层），启用优先级调度；

(4) 运维层：部署奥看 VMS 套件，对接 ELK 日志平台。

5.3 优化效果验证

5.3.1 存储容量指标

表 4：存储容量指标参数对比

指标	优化前	优化后	提升幅度
单节点有效容量	28TB	560TB	20 倍
90 天存储节点数	662 个	32 个	95.2% ↓
存储利用率	66.60%	91.60%	37.5% ↑

5.3.2 IO 性能指标

表 5：IO 性能指标参数对比

测试场景	并发路数	平均写入延迟	画面卡顿率	达标情况
高峰时段（8：00）	3000	172ms	3%	达标
并发回放（14：00）	300 路	256ms	4%	达标

5.3.3 数据可靠性指标

表 6：数据可靠性指标参数对比

测试场景	RTO（恢复时间）	RPO（数据丢失）	可靠性
单节点故障	4.2 分钟	0	99.9996%
双节点故障	7.8 分钟	0	99.9996%

5.3.4 运维效率指标

表 7：运维效率指标参数对比

指标	优化前	优化后	提升幅度
单点位配置耗时	30 分钟	5 分钟	83.3% ↓
故障排查耗时	60 分钟	15 分钟	75% ↓
设备管理覆盖率	60%	100%	66.7% ↑

5.3.5 成本指标 (3年TCO)

表 8: 成本指标参数对比(3年TCO, 单位: 万元)

成本项	优化前(万元)	优化后(万元)	节省幅度
设备采购成本	12000	4680	61% ↓
机房空间成本	864	34	96% ↓
运维人力成本	540	135	75% ↓
总 TCO	13404	7549	43% ↓

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文针对智慧城市视频存储云系统的“容量-I0-可靠性-运维”瓶颈, 提出融合超级编码、EC 纠删码、分层存储、统一 VMS 的优化策略, 通过惠州仲恺高新区案例验证:

- (1) 容量优化: 超级编码+EC 纠删码使存储利用率提升至 91.6%, 节点数减少 95.2%;
- (2) I0 提升: 分层存储+优先级调度使高峰延迟降至 172ms, 并发回放达标 300 路;
- (3) 可靠性增强: 跨区域容灾使 RT0 ≤ 8 分钟, 数据零丢失;
- (4) 成本降低: 3 年 TCO 减少 43%, 为大型视频监控项目提供性价比方案。

6.2 未来展望

- (1) AI 智能分层升级: 基于“内容价值-访问频率-存储成本”三维模型迭代, 融合大模型赋能的视频价值精准评估, 动态调整编码压缩率与存储层级, 进一步降低非核心数据存储成本;
- (2) 边缘-云协同深化: 优化轻量级 CNN+Transformer 混合模型, 融入全域多模态视频协同重建技术, 实现跨摄像头、跨模态 (RGB+红外) 的目标追踪与场景还原;
- (3) 国产化替代: 推广华为鲲鹏芯片、欧拉操作系统, 搭配国产率失真优化框架与硬件加速模块, 提升系统自主可控性;
- (4) 场景化延伸: 将三维分层存储与时空联合索引技术拓展至智慧应急、智慧施工场景, 联动场景孪生模型实现风险预警与快速响应;

参考文献

[1] 惠州仲恺高新区智慧城市二类视频监控系统等项

目概况[Z], 2022-2024.

[2] 华为技术有限公司. 视频存储解决方案[Z]. 2023.
 [3] 北京信息化协会. 城市智能交通工程项目监理验收规范 (T/BIA02-2020) [S]. 2020.
 [4] 华为技术有限公司. 交通视频存储解决方案[Z], 2023.
 [5] 华为技术有限公司. 视频存储解决方案园区智能安防 VMS 套件介绍[Z]. 2023.
 [6] 华为技术有限公司. M2241-EFL 聚焦以及补光灯的调试方法[Z]. 2023.

作者简介: 黄永安 (1988 年-), 男, 汉, 广东梅州人, 本科, 工程师, 任项目总监、信息化专家; 主要研究方向为无线网络、视频大数据及系统集成、信息化建设全过程管理等。

刘亚杰 (1991 年-), 女, 汉, 河南周口人, 本科, 工程师, 任项目总监; 主要研究方向为宽带技术、视频监控、无线技术、电力信息化及工程建设全过程管理。

蔡堃 (1985 年-), 男, 汉, 广东梅州人, 本科, 工程师, 任项目总监、技术专家, 主要研究方向为通信网络、视频监控系统、政府信息化和电力信息系统建设管理。

通信作者: 许雅思 (1988-), 男, 汉, 广东汕尾人, 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。

李志龙 (1983 年-), 男, 汉, 湖南郴州人, 本科双学士, 高级工程师, 主要研究方向为宽带技术、视频监控系统、无线网络、信息化及项目建设全过程管理。

黄文亮 (1984 年-) 男, 汉, 广东梅州人, 硕士研究生, 高级网络规划设计师; 主要研究方向为通信网络、大数据、信息系统开发等。