

# Design and Implementation of an Intelligent Interlinked Inspection System for Power Communication Rooms

Peijie Sun Minyi Lin Jia Chen

Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518022, China

## Abstract

As the new power system accelerates its evolution towards digitalization and intelligence, the existing power communication rooms, lacking an original intelligent Internet of Things architecture, generally suffer from weak state perception, numerous security blind spots, and lagging operation and maintenance responses. Moreover, under the requirements of security and compliance for critical infrastructure, there is an urgent need to establish an independently controllable intelligent inspection system. In response to these challenges, this paper proposes an intelligent interlinked inspection system for power communication rooms, which integrates three core technologies: multi-camera collaborative tracking, distributed networking, and WAPI end-to-end secure transmission. Firstly, a multi-view geometric modeling method based on a unified world coordinate system is proposed, which realizes the three-dimensional positioning of intrusion targets and seamless handover tracking across cameras through perspective ray back-projection and multicast collaboration. Secondly, based on the distributed soft bus architecture of OpenHarmony, a decentralized collaborative network is constructed that supports heterogeneous terminal self-discovery, low-latency communication, and hardware capability virtualization, significantly enhancing the interoperability of edge devices and resource scheduling efficiency. Finally, the system comprehensively adopts China's independent WAPI security protocol and SM2/SM3/SM4 national cryptographic algorithms to establish an end-to-end secure transmission mechanism covering device authentication, key negotiation, and data encryption, effectively resisting identity forgery and data eavesdropping and other wireless security threats. The actual deployment results show that the system, while ensuring high security, achieves core functions such as panoramic visualization of the room, intelligent environmental monitoring, and precise personnel control, providing a replicable and scalable technical model for the digital and intelligent operation and maintenance of power information and communication infrastructure.

## Keywords

Multi-camera collaboration; Distributed soft bus; WAPI security protocol; Full-stack independent controllability; Intelligent room

## 面向电力通信机房的智能联动巡检系统设计与实现

孙沛杰 林敏宜 陈嘉

深圳供电局有限公司, 中国 · 广东 深圳 518022

## 摘 要

随着新型电力系统加速向数字化、智能化演进, 存量电力通信机房因缺乏原生智能物联架构, 普遍存在状态感知弱、安防盲区多、运维响应滞后等瓶颈, 且在关键基础设施安全合规要求下, 亟需构建自主可控的智能巡检体系。针对上述挑战, 本文提出一套面向电力通信机房的智能联动巡检系统, 该系统融合多摄像头协同跟踪、分布式组网与WAPI端到端安全传输三大核心技术: 首先, 提出基于统一世界坐标系的多视角几何建模方法, 通过透视射线反投影与组播协同机制, 实现入侵目标的三维定位与跨摄像头无缝接力跟踪; 其次, 基于OpenHarmony的分布式软总线架构, 构建支持异构终端自发现、低时延通信与硬件能力虚拟化的去中心化协同网络, 显著提升边缘设备的互操作性与资源调度效率; 最后, 全面采用我国自主WAPI安全协议及SM2/SM3/SM4国密算法, 建立覆盖设备认证、密钥协商与数据加密的端到端安全传输机制, 有效抵御身份伪造、数据窃听等无线安全威胁。实际部署结果表明, 该系统在保障高安全性的同时, 实现了机房全景可视化、环境智能监测与人员精准管控等核心功能, 为电力信息通信基础设施的数智化运维提供了可复制、可推广的技术范式。

## 关键词

多摄像头协同; 分布式软总线; WAPI安全协议; 全栈自主可控; 智能机房

## 1 引言

新型电力系统数字化、智能化演进中, 电力通信机房作为关键业务核心节点, 其运维可靠性与安全韧性日益凸显。存量机房普遍缺乏智能物联系统, 存在环境感知薄弱、视频盲区多及人员管控粗放等问题, 难以满足高可靠运维需求。作为国家关键信息基础设施, 传统巡检依赖国外技术,

存在安全合规风险, 亟需全栈自主可控的智能巡检体系。

近年来, 多摄像头协同感知、分布式边缘计算与国产安全通信协议的发展为破解上述难题提供了技术契机。然而, 如何在封闭、电磁复杂的机房环境中, 实现高精度目标跟踪、低时延设备协同与端到端安全传输的一体化融合, 仍缺乏系统性解决方案。针对此, 本文提出一种面向电力通

信机房的智能联动巡检系统，系统采用统一世界坐标系下的多视角几何建模方法，实现入侵目标的三维定位与跨摄像头无缝接力跟踪；基于开源鸿蒙操作系统构建分布式软总线架构，支持异构终端自发现、自组网与资源共享；同时全面集成我国自主 WAPI 安全协议及 SM2/SM3/SM4 国密算法，建立覆盖接入认证、密钥协商与数据加密的端到端安全机制。该系统不仅提升了机房全景可视化与智能预警能力，更实现了从硬件、操作系统到通信协议的全链条国产化，为关键基础设施的数智化、本质安全化运维提供了可推广的技术路径。

## 2 系统概述

本文所构建的电力通信机房智能联动巡检系统，以“全栈自主可控、智能协同感知、内生安全可信”为核心设计理念，整体架构涵盖设备层与应用层，形成从边缘感知、协同传输到平台管控的一体化闭环体系。系统由三大关键技术模块有机集成：多摄像头智能联动跟踪算法、基于开源鸿蒙的分布式协同组网技术，以及基于 WAPI 协议的端到端安全传输机制，实现了从硬件终端、操作系统、通信链路到上层应用的全链条国产化与安全加固。

在感知层面，系统部署具备 4K 超高清成像、红外夜视与人形识别能力的鸿蒙 AI 摄像头作为核心视觉节点。该类终端不仅支持本地智能分析，还可通过多视角几何建模与组播协同机制，实现对移动目标（如运维人员或异常入侵者）在三维空间中的精确定位与跨摄像头无缝接力跟踪，有效消除监控盲区并优化设备部署密度。在组网层面，依托 OpenHarmony 操作系统的分布式软总线能力，系统构建了一个去中心化的异构终端自组网环境，兼容 Wi-Fi 6、蓝牙、星闪等多种近场通信方式，支持摄像头、温湿度传感器、门禁控制器等设备的即插即用、能力虚拟化与资源协同调度，显著提升边缘侧响应效率与系统可扩展性。在安全方面，所有无线通信均采用我国自主制定的 WAPI (Wireless Authentication and Privacy Infrastructure) 协议，结合 SM2/SM3/SM4 国密算法，实现设备双向认证、会话密钥动态协商及视频流端到端加密，确保数据在传输过程中的机密性、完整性与身份可信性。

## 3 关键技术

### 3.1 多摄像头智能联动跟踪算法

为有效缓解电力通信机房巡检视场角受限与大规模部署成本高昂之间的矛盾，本文提出一种基于统一世界坐标系的多摄像头协同联动跟踪方法。该方法首先对监控场景进行三维空间建模，建立各摄像头成像平面与其在全局世界坐标系中位姿之间的几何映射关系。当任一 AI 摄像机检测到目标（如人形入侵者）时，系统结合其在图像像素坐标系中的位置  $(u, v)$  与当前云台的姿态角  $(\theta, \gamma)$ ，通过透视射线反投影方程实时解算出目标在世界坐标系下的三维位置，并将

该位置信息通过高效组播协议广播至协同网络中的其他设备，AI 摄像头联动定位的实现步骤如下：

对机房建立世界坐标系  $O_w-X_wY_wZ_w$ ，光心坐标系  $O_c-X_cY_cZ_c$ 。

设被观测点在光心坐标系中的坐标为  $P_c$ ，相机焦距为  $f$ ，被观测点在焦平面的透视投影点为  $P_c'$ ，其在图像物理坐标系  $O_i-X_iY_i$  的坐标为  $(x_i, y_i)$ ，在光心坐标系的坐标为  $(x_i, y_i, f)$ 。则有：

$$\begin{aligned} dx &= \frac{2 \cdot \tan(\alpha_h/2) \cdot f}{u_m} \\ dy &= \frac{2 \cdot \tan(\alpha_v/2) \cdot f}{v_m} \end{aligned}$$

其中， $dx$  为每个像素对应到图像物理坐标系的水平距离， $dy$  为每个像素对应到图像物理坐标系的垂直距离， $\alpha_h$  为相机的水平视场角， $\alpha_v$  为相机的垂直视场角。然后通过转换关系可得：

$$\begin{aligned} x_i &= (u - \frac{u_m}{2}) \cdot dx = (\frac{2u}{u_m} - 1) \cdot \tan(\alpha_h/2) \cdot f \\ y_i &= (v - \frac{v_m}{2}) \cdot dy = \frac{(2v - v_m)}{v_m} \cdot \tan(\alpha_v/2) \cdot f \end{aligned}$$

设向量  $\vec{u}_c$  可满足

$$\vec{u}_w = R_b R_\theta R_\lambda \vec{u}_c$$

设  $O_c$  在世界坐标的坐标为  $K_0$ ，则：

$$\begin{bmatrix} K_0 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^w T_C \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b R_\theta R_\lambda B_c + B_b \\ 1 \end{bmatrix}$$

则被观测点在世界坐标系中的透视射线方程为：

$$K(t) = K_0 + t \hat{u}_w$$

基于透视射线方程即可换算出世界坐标系下“入侵者”坐标。当监控模块计算出“入侵者”的位置并将位置信息发布到联动组中后，预警模块负责监听联动组播组的消息，收集所有其他云台机发布的“入侵者”信息，判断是否有“入侵者”即将进入自己的监控范围。如果有，则调整云台姿态，提前启动录像功能。

基于自身视场模型与目标运动轨迹预测，系统可判断该目标是否即将进入本机监控范围，若判定成立，则提前调整云台姿态并启动录像功能，从而实现无缝接力跟踪。该机制在确保全域无监控盲区的同时，显著优化了摄像头部署密度，降低硬件投入与运维成本，整体方案通过几何建模、分布式感知与智能预调度的有机融合，实现了从“被动响应”到“主动预判”的监控范式跃迁，为电力巡检、周界安防等对连续性、实时性与可靠性要求严苛的应用场景提供了高性价比、高鲁棒性的视觉协同感知解决方案。

### 3.2 分布式协同组网技术

为支撑电力、能源等关键场景中多类型智能终端（如摄像头、环境传感器、边缘计算节点等）的高效协同与近场运维，本文提出一种基于开源鸿蒙操作系统 (OpenHarmony) 的分布式协同组网技术。该技术充分利用鸿蒙特有的分布式

软总线、原子化服务及轻量化裁剪机制,构建去中心化的设备协同网络,实现异构终端的快速自组网、跨协议互操作、硬件互助与资源共享。

该技术采用分层解耦的设计范式,由物理层、软总线层、核心能力层与应用服务层构成主干,并集成贯穿全栈的安全子系统与调度子系统,形成端到端的协同闭环。在物理层,系统兼容 Wi-Fi 6/6E、蓝牙/BLE、NFC、星闪(NearLink)及以太网等多种异构通信链路,为复杂部署环境提供灵活的底层接入能力。软总线层作为技术核心,通过统一抽象屏蔽底层协议差异,提供设备自动发现、动态连接管理、拓扑自适应构建、高可靠数据传输及标准化 API 接口;其采用极简协议栈与动态路由机制,可保障控制类指令端到端时延低于 20ms,满足实时性要求严苛的应用场景。

在软总线基础上,核心能力层实现分布式任务调度、分布式数据管理、设备虚拟化与多源数据融合,将异构终端的计算、存储与感知资源抽象为统一的能力池,支持跨设备的任务协同执行与资源弹性调度。应用服务层则面向上层业务,提供原子化服务编排、分布式能力调用及多屏协同接口,支撑任务无缝流转、跨端交互等典型应用场景。安全与调度作为关键支撑模块贯穿各层:安全子系统集成可信认证、端到端加密(基于国密算法)、细粒度权限管控与设备双向鉴权机制,确保从设备接入到数据交互全过程的安全可控;调度子系统则基于负载感知、链路质量评估与任务拆分-聚合策略,动态优化资源分配与执行路径,提升系统整体能效与响应效率。

该技术通过一套统一的软件基座,有效解决了传统传感网络中设备孤岛、协议碎片化与运维成本高等问题,显著减少现场传感接收终端的部署数量,并大幅提升设备进场后的自组织与自维护能力,为构建高可靠、低时延、易扩展的电力通信机房的智能联动巡检提供了可行的技术路径。

### 3.3 端到端安全传输机制

针对电力系统中视频图像等敏感数据在无线传输过程中面临的身份伪造、数据窃听与非法接入等安全威胁,本文提出一种基于我国自主标准 WAPI 协议的端到端安全传输机制。该机制以“身份可信—链路可靠—数据加密—访问可控”为核心逻辑,构建覆盖设备接入、密钥协商与数据传输全过程的安全闭环。

WAPI 协议由无线局域网鉴别(WAI)与无线局域网保密(WPI)两个子协议构成。其中,WAI 通过双向认证机制实现接入点(AP)与终端设备的相互身份验证,有效抵御伪 AP 攻击与非法终端接入;WPI 则基于协商生成的会话密钥,对传输数据实施高强度加密与完整性保护。在密码算法层面,本方案全面采用国家密码管理局批准的国密算法体

系:利用 SM2 椭圆曲线公钥算法完成设备证书验证与密钥协商,SM4 分组密码算法对视频流等大容量数据进行实时加解密,并结合 SM3 杂凑算法生成消息认证码(MAC),确保数据完整性与身份绑定。

端到端安全传输机制具体实现流程包括三个阶段:首先,在设备接入阶段,双方交换数字证书并执行基于 SM2 的挑战-应答式双向鉴别;其次,通过 WAI 协议完成会话密钥的协商与同步,密钥材料由临时公私钥对经 SM2 密钥交换生成,并经 SM3 哈希派生;最后,在数据传输阶段,终端将视频数据按传输单元分片,采用 SM4 算法加密并附加 SM3-MAC,实现端到端的机密性与完整性保障。

为进一步提升系统鲁棒性,本技术引入三项关键保障措施:(1)分级访问控制,通过在终端证书中嵌入权限标识,使 AP 可根据预设策略动态分配网络资源;(2)多链路冗余加密,支持终端在主链路正常时预协商备用 AP 的会话密钥,实现链路切换过程中的无缝安全切换,保障视频流连续性;(3)安全日志与溯源机制,自动记录各安全节点操作日志并同步至云端数据库,为事后分析与责任认定提供依据。

综上,该技术通过双向身份认证、国密算法强加密与动态链路验证,有效解决了电力无线通信中身份不可信、数据易泄露与链路不稳定等核心问题,满足关键基础设施对高安全、低时延、高可靠无线传输的综合需求。

## 4 结语

本文提出面向超大城市电力通信机房的智能联动巡检系统,以多摄像头协同跟踪算法为感知手段,基于统一世界坐标系实现目标三维定位与跨视域无缝跟踪;依托开源鸿蒙构建分布式软总线,支持异构终端自发现、自组网与资源共享;集成 WAPI 安全协议及 SM2/SM3/SM4 国密算法,建立端到端安全机制。系统显著提升电力通信机房全景可视化、环境监测等运维能力,降低硬件部署密度,增强响应实时性与网络安全防护。该系统已在深圳试点验证,展现低投入、高效益优势,为关键基础设施提供技术先进、安全合规的智能巡检新路径,有力支撑新型电力系统数字化转型与本质安全能力建设。

### 参考文献

- [1] 亢旭源,张林林,刘普森,等.电力通信机房运维管理智能化应用研究[C].中国水力发电工程学会梯级调度控制专业委员会2023年年会论文集,2023:213-221.DOI:10.26914
- [2] 张文准,徐红泉,吴奕,等.机房智能巡检设备设计与应用[J].中国电力企业管理,2023,(33):67.
- [3] 郑荣锋,周超,卢云,等.数据中心机房智能巡检系统设计及应用[J].无线互联科技,2025,22(05):28-31.