

基于 AI 感知的变电站智慧门禁协同管控技术研究

张宋彬 石云松 郑含璐 吕婉煜 许冬 朱建伟 刘朋辉 刘霖

国网郑州供电公司变电运维中心, 河南 郑州 450000

[摘要]针对无人值守变电站传统钥匙登记模式通行效率低下、普通锁具安防能力不足、人员进出缺少全流程追溯手段等运维痛点,文中研究了一套基于 AI 感知的变电站智慧门禁协同管控系统。系统融合工业硬件终端、5G 流量池共享传输、改进 CNN 人脸识别算法、移动端小程序远程管控能力,构建了“感知采集-边缘处理-云端分析-移动处置”四层协同管控架构。文章阐述了系统总体架构、硬件及 5G 流量池传输实现方案,重点说明了改进卷积神经网络人脸识别算法、通行行为时序研判算法的计算流程,结合变电站现场试运行数据完成了算法指标验证。测试结果表明:复杂工况下人脸识别准确率达到 99.5%,异常行为识别准确率为 99%,预警响应延时 1s,5G 传输时延控制在 10ms 以内。系统在 220kV 会展变电站落地应用,实现了人员出入智能核验、异常风险主动告警、访客权限数字化审批,有效提升了变电站出入口安防管控智能化水平,可为同类无人值守变电站门禁改造提供技术参考。

[关键词]变电站;智慧门禁;5G 流量池;卷积神经网络;AI 感知;边缘计算

DOI: 10.33142/hst.v9i8.20432

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Research on Collaborative Control Technology of Intelligent Access Control for Substations Based on AI Perception

ZHANG Songbin, SHI Yunsong, ZHENG Hanlu, LYU Wanyu, XU Dong, ZHU Jianwei, LIU Penghui, LIU Lin

Substation Operation and Maintenance Center of State Grid Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: In response to the operational pain points of low efficiency of traditional key registration mode in unmanned substations, insufficient security capabilities of ordinary locks, and lack of full process traceability methods for personnel entry and exit, this paper studies a smart access control collaborative control system for substations based on AI perception. The system integrates industrial hardware terminals, 5G traffic pool shared transmission, improved CNN facial recognition algorithm, and remote control capability of mobile mini programs, and constructs a four layer collaborative control architecture of "perception collection edge processing cloud analysis mobile disposal". The article elaborates on the overall system architecture, hardware, and implementation plan for 5G traffic pool transmission, with a focus on improving the convolutional neural network face recognition algorithm and the calculation process of the traffic behavior timing analysis algorithm. The algorithm indicators are verified by combining on-site trial operation data of the substation. The test results show that the accuracy of facial recognition under complex working conditions reaches 99.5%, the accuracy of abnormal behavior recognition is 99%, the warning response delay is 1 second, and the 5G transmission delay is controlled within 10 milliseconds. The system has been implemented in the 220kV exhibition substation, achieving intelligent verification of personnel entry and exit, proactive warning of abnormal risks, and digital approval of visitor permissions, effectively improving the intelligent level of security control at the entrance and exit of the substation. It can provide technical reference for the access control renovation of similar unmanned substations.

Keywords: substation; smart access control; 5G traffic pool; convolutional neural network; AI perception; edge computing

引言

变电站作为电网关键基础设施,出入口人员安全管控是安全生产的重要一环。当前,国网郑州供电公司所辖大量变电站采用无人值守运行模式,站点地理位置分散,外

来检修、施工人员进站时,往往需要运维人员往返运维班驻地完成钥匙借用登记,流程繁琐,通行效率低下。传统机械锁只具备物理闭锁能力,缺少身份识别、通行记录留存及异常告警能力,无法满足电力安全生产对人员可管、

行为可溯、风险可预警的管控要求。

现有门禁产品大多面向写字楼、园区场景，直接应用于变电站存在明显短板：变电站存在强电磁辐射、高低温、雨雪逆光等复杂现场环境；多站点分散部署带来 SIM 卡流量成本高、组网零散；人员佩戴安全帽、口罩及逆光阴影干扰会大幅降低人脸识别效果；同时缺少适配电力场景的移动端远程审批、远程开门及分级告警闭环处置功能。

为此，本项目开展基于 AI 感知的变电站智慧门禁协同管控技术研究，集成智能感知硬件、5G 流量池共享传输网络、改进 CNN 人脸识别模型、时序通行行为分析算法以及移动端小程序管控模块，搭建了变电站智慧门禁协同管控系统，系统性地解决了无人值守变电站人员出入管控的现实难题。

1 系统总体架构设计

本智慧门禁协同管控系统打破了传统的“单点孤岛式”管理模式，采用了分层分布式、云边协同的总体架构，主要划分为感知采集层、边缘处理层、云端平台层、移动应用层四层结构：

（1）感知采集层

部署人脸识别门禁一体机、NFC 刷卡模块、人体红外传感器、电控锁、声光告警器、环境传感器等终端硬件，采集人员人脸图像、刷卡信息、门禁开关状态及现场环境参数。硬件采用工业级抗干扰设计，具备 $-30^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 宽

温工作能力，达到 IP65 防尘防水等级，并增设金属电磁屏蔽外壳，有效抵御变电站高压设备带来的强电磁辐射干扰。

（2）边缘处理层

以工业边缘计算网关为核心，接收感知层原始数据，完成数据过滤、去重与预处理，本地缓存通行记录和抓拍图片，支持断网离线管控。部署轻量化 AI 推理模型，在边缘侧执行人脸识别初筛及异常行为初步判别，大幅减轻云端算力压力。网关对接 5G 工业模组，依托 5G 流量池完成数据上送，同时接收云端及移动端下发的控制指令驱动门禁设备执行启闭与告警动作。

（3）云端平台层

包含管理后台、AI 模型服务、数据库及 GIS 数据驾驶舱可视化模块。数据库存储人员档案、权限台账、通行日志、抓拍图库与告警记录；AI 模型服务完成人脸特征比对、通行行为时序分析及分级风险研判；GIS 驾驶舱将各变电站站点通行统计数据可视化展示，支持站点设备状态查看、批量权限下发与告警集中处置。

（4）移动应用层

基于 uniapp 开发跨平台小程序移动端，实现访客入站申请、员工人脸信息录入、远程开门、申请审批、告警消息推送及通行记录查询等功能，设置四级分级权限，不同岗位运维人员分配对应操作权限，实现随时随地的移动化协同管控。

变电站智慧门禁协同管控系统架构

AI感知·5G传输·边缘计算·移动管控



图 1 智慧门禁协同管控系统总体架构图

2 硬件与 5G 流量池共享传输技术实现

2.1 硬件部署实施要点

结合变电站出入口布局与电磁环境开展现场勘查，在主控室大门、设备区出入口及围墙通道点位精准部署门禁

一体机、电控锁与人体感应传感器；机房部署工业边缘网关与 5G 模组。布线采用严格的电气隔离，弱电通信线缆与高压强电电缆分层铺设，全面规避电磁耦合干扰。硬件完成单体调试，校验识别灵敏度与门锁启闭响应速度，彻

底排除接线与信号故障。



图2 现场门禁硬件改造实拍图

2.2 5G 流量池共享传输原理与计算流程

传统方案中，每个门禁终端配置独立 SIM 卡，流量分散，整体成本高且带宽资源无法动态调配。本项目采用 5G-SA 独立组网+共享流量池技术，将全部站点所有门禁、网关的通信流量归集到统一流量池，由调度算法动态分配上下行带宽资源。

流量调度算法逻辑：

①定义终端集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ，每个终端实时上报业务类型：普通报文、抓拍图片、高清视频、告警上报；

②设置业务优先级权重：告警业务>视频抓拍业务>普通通行报文业务；

③实时统计每个终端已消耗流量 F_i 、业务请求带宽 B_i 以及总可用池流量 F_{total} ；

④对高优先级业务优先分配所需带宽，回收空闲终端未使用的流量资源；当总流量接近配额阈值时，自动触发流量预警。

系统搭建了 5G 无线、工业有线双链路冗余备份，实时监测链路时延 $Delay$ 与丢包率 $Loss$ 。当满足 $Delay > \tau_1$ 或者 $Loss > \tau_2$ 的阈值条件时，系统自动无缝切换备用链路，保障无人值守场景下的网络连续性。

全部采集、传输、控制指令采用国密 SM4 端到端加密，网关-传输链路-云端三层加密部署，原始明文绝不在网络中传输。同时配置断点续传机制，在网络短暂中断时，边缘网关本地缓存数据，网络恢复后自动续传，避免通行记录丢失。经过实测优化，整套传输链路端到端时延控制在10ms以内，相比单 SIM 卡分散组网，流量资源利用率提升了40%以上。

3 AI 感知核心算法原理与计算流程

系统 AI 模块主要包含两部分：改进的 CNN 卷积神经网络人脸识别算法，以及通行行为时序风险研判算法。

3.1 改进 CNN 人脸识别算法

变电站场景下，运维人员经常佩戴安全帽、口罩，同时存在逆光、强光、阴影及雨雪等复杂光照条件，传统通用人脸识别模型的识别效果往往显著下降。本文对 CNN 卷积神经网络进行了针对性改进，面向电力运维场景做迁移学习微调训练。

3.1.1 数据集构建

数据集由“通用人脸数据集+变电站现场采集标注数据集”共同构成。现场采集样本涵盖：佩戴安全帽、佩戴口罩、逆光、夜间暗光及雨雪环境下的真实人脸图像。数据集按照 7:2:1 的比例划分为训练集 D_{train} 、验证集 D_{val} 与测试集 D_{test} 。

预处理步骤包括：图像归一化裁剪、灰度均衡、降噪，并打上人员身份标签、遮挡类型标签及光照场景标签。

3.1.2 网络模型结构与计算流程

在基础 CNN 网络上调整卷积核尺寸与池化参数，弱化帽子、口罩等干扰特征的权重，强化眼睛、眉骨等人脸稳定核心特征区域的特征提取能力。模型推理计算流程：

输入人脸图像 $I \rightarrow$ 卷积层提取多维度特征图 $\rightarrow$ 池化层降维 $\rightarrow$ 全连接层输出人脸高维特征向量 $F(I) \in \mathbb{R}^d$ 。

系统人员库预先存储授权人员的标准人脸特征向量集合 $\{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ 。

计算待识别人脸特征向量 F_{query} 和库内每一条特征向量 F_k 之间的余弦相似度：

$$\text{Sim}(F_{query}, F_k) = \frac{F_{query} \cdot F_k}{\|F_{query}\| \cdot \|F_k\|}$$

设置相似度阈值 θ ，若 $\max(\text{Sim}) \geq \theta$ ，判定匹配成功，输出对应人员身份；若全部 $\text{Sim} < \theta$ ，判定为陌生人员，触发安全预警标记。

训练阶段采用反向传播算法迭代更新网络权重，不断降低识别损失，减少误识率与拒识率。同时引入迁移学习策略，先使用通用人脸数据集预训练，再使用变电站现场样本微调，大幅减少了电力场景样本的训练需求，显著提升了遮挡、逆光工况下的识别性能。

3.2 通行行为时序风险研判算法

除人脸身份核验外，系统基于时序通行记录，自动识别非工作时段通行、超时站内滞留、越权限跨区域通行及高频异常进出等风险行为。

设某人员的通行时序序列为

$S = \{(t_1, loc_1), (t_2, loc_2), \dots, (t_n, loc_n)\}$, 其中 t_i 为通行时间, loc_i 为通行站点或区域位置。

3.2.1 构建正常行为基准模型

学习运维、检修、访客等不同类型人员的历史通行样本, 得到各类人员的正常时间窗口 $[T_{start}, T_{end}]$ 、允许通行区域集合 Loc_{allow} 以及最大允许滞留时长 Dur_{max} 。

3.2.2 逐条比对实时通行行为

若通行时刻 $t_i \notin [T_{start}, T_{end}]$, 判定为非工作时间通行; 若 $loc_i \notin Loc_{allow}$, 判定为越权跨区域通行; 若人员站内滞留时间 $Dur > Dur_{max}$, 判定为超时滞留。

3.2.3 分级告警输出

将风险划分为普通提醒、一般告警、紧急告警三个等级。普通提醒仅做后台日志记录; 一般告警触发后台弹窗

及消息推送; 紧急告警则同时触发现场声光告警与移动端强提醒, 通知运维人员第一时间进行应急处置。

4 系统测试与现场算法指标验证

4.1 测试环境

测试地点位于国网郑州供电公司 220kV 会展变电站, 测试时间跨度为 2025 年 7 月至 2026 年 6 月 (完整试运行周期)。硬件配置: 智慧门禁一体机、工业边缘网关、5G-SA 专网; 云端服务器配置 16 核 CPU、64GB 内存; 软件采用智慧门禁系统 V1.0、TensorFlow 推理框架及移动端小程序。第三方软件检测机构 (湖北科鉴检验检测有限公司) 按照 GB/T 25000.51-2016 标准开展软件功能与安全性检测, 共计执行测试用例 33 项, 缺陷数为 0, 系统功能与信息安全性判定全部符合要求。



图 3 软件的现场应用与第三方检测报告

4.2 现场试运行实测数据

表 1 列出了变电站现场试运行阶段的关键指标:

表 1 变电站现场试运行关键指标

测试项目	指标结果
平台在线率	100%
设备整体在线率	99.6%
设备整体在线率	1,862 人次
累计通行总人次	99.3%
人脸识别通过率	12 次 (告警处理率 100%)
异常告警总次数	76 条
访客登记授权记录	312 次 (联动成功率 100%)
视频联动触发次数	$\geq 99.5\%$
复杂工况人脸识别准确率	$\geq 99\%$
异常通行行为识别准确率	$\leq 1\text{ s}$
预警响应时延	$\leq 10\text{ ms}$
5G 传输端到端时延	100%

从现场实测数据可以看出:

①在安全帽、口罩佩戴、逆光等复杂现场条件下, 改进 CNN 算法的人脸识别准确率达到 $\geq 99.5\%$, 完美满足变电站的高精度身份核验需求;

②时序行为分析算法对超时滞留、越权访问、陌生闯入的识别准确率达到 $\geq 99\%$, 告警响应时延控制在 1s 以内, 实现了变电站安全风险的主动发现;

③5G 流量池传输链路表现稳定, 时延控制在 10ms 以内, 双链路自动切换机制有力保障了无人值守场景下的不间断运行;

④试运行期间的 76 人次访客全部实现了数字化审批授权, 通行记录与告警日志完整留存, 完全满足电网安全可追溯的审计要求。

4.3 应用效益分析

本系统于 2025 年 7 月 3 日在会展变电站正式投入应

用,实现了运维人员刷脸无感通行、访客线上申请审批,彻底改变了以往需要往返运维班借还钥匙的传统模式,通行效率提升了 80%。在经济效益方面,通过节约值守人力、降低安全管理成本,2025 年节支 3.6 万元,2026 年预计节支 4.2 万元,累计节支 7.8 万元。在社会效益上,系统构建了变电站出入口全流程数字化安防管控,有效防范了无关人员非法进站风险,保障了电网主设备安全运行,具备极高的向其他无人值守变电站大规模推广复制的价值。

5 系统软件功能与移动端实现

云端管理后台实现站点管理、人员档案、权限时效配置、门禁设备管理、监控设备管理、通行记录查询导出、访客审批、角色分级权限配置及 GIS 数据驾驶舱可视化,所有关键操作日志留存 ≥ 90 天,告警日志留存 ≥ 180 天,完全满足电力安全审计要求。

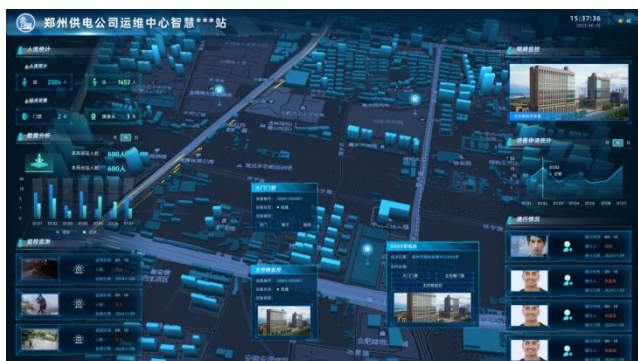


图4 管理驾驶舱 GIS 可视化界面

移动端小程序采用 uniapp 跨平台开发,全面适配 Android 与 iOS 系统。主要功能模块包含:

5.1 入站访客申请

访客在线填写身份信息、访问站点、访问时段,并上传人脸照片提交申请。

5.2 审批模块

管理人员接收待办消息,在线一键通过或驳回访客申请,审批通过后系统自动下发限时通行权限。

5.3 远程操控

对授权站点实现一键远程开门,并实时查看设备在线状态。

5.4 消息告警

精准接收非法闯入、设备故障、超时滞留等告警消息推送。

5.5 员工录入

移动端直接提交内部人员基础资料与人脸信息,实时同步至后台数据库。

系统严格设置了四级权限角色:超级管理员、运维管

理员、值班人员、临时管理员,严格界定操作范围,防止越权操作;移动端全部操作自动记录操作人员账号、时间与具体内容,实现操作行为的全程可追溯。



图5 移动端小程序界面

6 结论与展望

本文针对无人值守变电站传统门禁的管控短板,设计并实现了一套基于 AI 感知的变电站智慧门禁协同管控系统。系统有机融合了工业级感知硬件、5G 共享流量池传输网络、改进 CNN 人脸识别算法、时序通行行为风险研判算法,并配套云端管理平台与移动端小程序,形成了完整的变电站出入口智能管控解决方案。

现场试运行结果表明:算法识别精度、传输时延与系统稳定性完全达到电力现场应用指标,成功替代了传统钥匙登记模式,实现了人脸无感通行、访客数字化审批、异常风险主动告警及通行行为全程可追溯,显著提升了变电站安防管控的智能化水平。

后续的工作方向主要包括:

①扩充逆光、强光、雨雪等极端工况的人脸样本库,引入图像增强预处理模块,持续迭代优化人脸识别 CNN 模型,进一步降低极端光照场景下的识别失败概率;

②对现场门禁设备的安装点位与抓拍角度进行精细化整改调试,优化动态远距离人脸采集效果;

③打通智慧门禁系统与变电站站内辅助监控平台的深度双向接口,实现告警事件自动调取视频、联动录像与协同处置,彻底破除数据孤岛,构建全站一体化安防协同体系;

④后续计划在更多变电站批量部署,积累多站点大规模运行数据,进一步优化算法泛化能力,探索员工行为统计、安全风险挖掘等增值数据分析服务。

[参考文献]

- [1]国家市场监督管理总局.GB/T25000.51-2016 系统与软件工程系统与软件质量要求和评价第51部分:就绪可用软件产品(RUSP)的质量要求和测试细则[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [2]王健,刘进.变电站智能门禁系统关键技术研究与应用[J].电力安全技术,2022,24(6):45-48.

[3]张航,刘荣.基于改进 CNN 的复杂环境下人脸识别算法研究[J].计算机仿真,2023,40(2):432-436.

[4]李洋.5G 边缘计算在电力变电站物联网中的应用研究[J].电工技术,2024(8):121-123.

[5]陈宇.无人值守变电站人员出入智能管控方案[J].农村电气化,2023(5):38-40.

作者简介:张宋彬(1989—),男,汉族,河南商丘市永城市人,硕士研究生,就职于国网河南省电力公司郑州供电公司变电运维中心,现担任变电运维中心主任,高级工程师,从事电力系统、自动控制工作。