

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0046-06

基于云边协同的电力现场作业终端智能化研究

吴振田, 杨志花, 罗崇立, 吕灵智, 柯伟铭

(广东电力通信科技有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 针对电力现场作业终端面临的网络安全、传输不稳及智能化不足等问题, 提出一套基于云边协同架构的终端智能化解决方案。通过分析云边协同技术在电力作业中的应用模式, 明确了云端与边缘侧的分工与协作机制。设计面向现场的智能监控与行为判别技术, 涵盖中心云模型训练、模型轻量化部署及边缘实时推理等关键环节。改进包括快速检测网络、多级识别结构、姿态估计分支、行为分析模块及动态优化控制器在内的深度学习算法, 提升边缘终端的分析效率与准确性。融合无线局域网鉴别与保密基础结构 (wireless LAN authentication and privacy infrastructure, WAPI) 安全协议与智能布控球算法, 设计具备内生安全能力的边缘感知节点, 阐述安全认证与智能分析的协同原理, 从传输与处理两方面加固终端安全。实际部署测试表明, 该方案能有效提升终端的数据防护、通信可靠性与智能处理水平, 在降低人工负荷的同时, 增强作业管理的精准性与响应速度。

关键词: 智能变电站; 云边协同; 布控球; WAPI; 现场作业; 终端智能化

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0046-06

Research on the intelligentization of substation on-site operation terminals based on cloud-edge collaboration

WU Zhentian, YANG Zhihua, LUO Chongli, LYU Lingzhi, KE Weiming

(Guangdong Electric Power Communication Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: Aiming at the problems of cybersecurity risks, unstable data transmission, and insufficient intelligence levels faced by power field operation terminals, this paper proposes an intelligent terminal solution based on a cloud-edge collaborative architecture. By analyzing the application patterns of cloud-edge collaboration technology in power operations, the functional division and cooperation mechanism between the cloud and the edge side are clarified. An on-site-oriented intelligent monitoring and behavior discrimination technology is designed, covering key aspects such as central cloud model training, model lightweight deployment, and edge-side real-time inference. Improvements are made to deep learning algorithms including rapid detection networks, multi-level cascade recognition structures, high-precision pose estimation branches, behavior semantic analysis modules, and resource-adaptive dynamic optimization controllers, thereby enhancing the analysis efficiency and accuracy of edge terminals. By integrating the wireless LAN authentication and privacy infrastructure (WAPI) security protocol with intelligent surveillance sphere algorithms, an edge sensing node with endogenous security capabilities is designed. The collaborative principle between the security authentication mechanism and the intelligent analysis process is elaborated, strengthening terminal security from both transmission and processing dimensions. Actual deployment and testing demonstrate that this solution can effectively enhance the data protection capability, communication reliability, and intelligent processing level of terminal devices, while reducing manual monitoring workload and improving the precision and response speed of operation management.

Keywords: intelligent substation; cloud-edge collaboration; surveillancespheres; WAPI; field operations; terminal intelligence

布控球是一种用于电力作业现场视频监控和安全管理移动摄像机的。主要用于监控各作业班组和施工单位的现场作业, 以提供实时监控、违章识别和应急响应等功能。布控球属于作业现场安全管控工具, 主要由施工作业单位采购, 价格为优先考虑因素, 会出现只重视视频功能而忽略智能化的现象。其次, 布控球的生产厂家众多, 标准不统一, 存在视频无法接入或者只能接入特定平台的问

题。另一方面, 目前的布控球都是采用 4/5G 传输, 从作业单位讲需要额外支付流量费用, 从网络安全角度讲从互联网接入, 存在安全隐患, 从通信角度讲, 传输会受运营商网络覆盖、信号强度的影响, 存在无信号或者信号不稳定的情况。因此, 需要研究基于智慧安监的云边协同系统, 支持多种协议, 兼容市面主流摄像头协议, 结合云端计算、边端智能网关实现智能化, 通过改进终端设备采用无线局

收稿日期: 2024-07-26; 录用日期: 2024-09-20

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目资助 (TK2022121122100224)

作者简介: 吴振田 (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电力工程技术、电力通信技术。

引用本文: 吴振田, 杨志花, 罗崇立, 等. 基于云边协同的电力现场作业终端智能化研究 [J]. 自动化技术与应用, 2026, 45 (3): 46-51. (WU Zhentian, YANG Zhihua, LUO Chongli, et al. Research on the intelligentization of substation on-site operation terminals based on cloud-edge collaboration [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45 (3): 46-51.)

域网鉴别与保密基础结构(WAPI)传输优化网络,形成优化的智慧安监综合解决方案。为此,本文提出了基于云边协同的电力现场作业终端智能化研究。

针对电力场景布控球研究较少,文献[1]分析了基于布控球技术的机具安全作业系统。文献[2]研究了基于布控球技术的煤矿视频监控系统。文献[3]研究了基于移动应用的布控球在变电站仪器仪表监测。文献[4]研究了基于分布式状态估计技术在变电站布控球实时数据分析。文献[5]研究了基于GPS-RTK精准定位的智能穿戴设备与安监布控球联动目标跟踪方法。文献[6]研究了电力行业风险较大作业项目安全管控。针对WAPI的应用,文献[7]研究了基于WAPI技术的智能电网终端通信模式。文献[8]设计了基于WAPI技术的安全执法仪通信模块。

上述内容说明,布控球在电力场景需要人员监视的作业、巡视管控应用广泛,但是针对布控球这一可移动设备的智能化研究仍显不足。

而针对变电站的云边协同,文献[9]提出了云边端协同的区域智能巡视系统。文献[10]提出了基于云边端协同技术的电力安全管控系统。文献[11]研究了云边协同框架下结合深度学习与随机森林的电力设备识别。文献[12]设计了基于云边协同的变电站倒闸操作平台。文献[13]分析了基于云边协同的变电站倒闸防误操作关键技术。可见云边协同应用于变电站能够有效提升数据处理水平,尤其是应用于运维操作等领域可以大幅度提升变电站的智能化水平。

为此,本文提出了基于云边协同的电力现场作业终端智能化研究。以云边协同架构为基础,结合现场作业监控智能判别技术,提出以智能布控球为安全智能设备的控制算法,实现作业智能化。

1 云边协同架构设计

1.1 云边协同概述

云边协同结合了云计算的强大数据处理能力和边缘计算的即时响应能力。在变电站现场作业中,云边协同架构通过部署在场站近端的智能网关作为边缘计算节点,可以实现低时延的数据处理,这对于实时安全监控至关重要。边缘节点负责初步的数据采集和处理,比如信号滤波、去噪等,只将必要的数据上传至云端,从而提升数据处理的效率^[14]。

在云端,智慧安监平台则执行更复杂的分析与计算任务,如数据聚合、趋势预测和高级安全分析。例如为不具备智能识别算法的布控球提供云计算并下发告警信息。也可以根据场站的历史数据和实时反馈,调整边缘节点的计算模型和参数,实现自适应联动,优化现场的作业安全。

为了实现云边协同的架构,必须设计高效的数据处理算法。在边缘节点,算法需要能够在硬件资源有限的情况下运行,它应该能够快速处理传感器数据,识别关键的安

全告警信号。同时,云端算法更注重机器学习和大数据分析。利用从边缘节点收集来的数据,可以设计复杂的预测模型,如深度学习神经网络,用于识别变电站的运行模式和预测可能的故障。

1.2 云边协同架构

云边协同架构如图1所示,包括感知层、网络层、平台层和应用层。

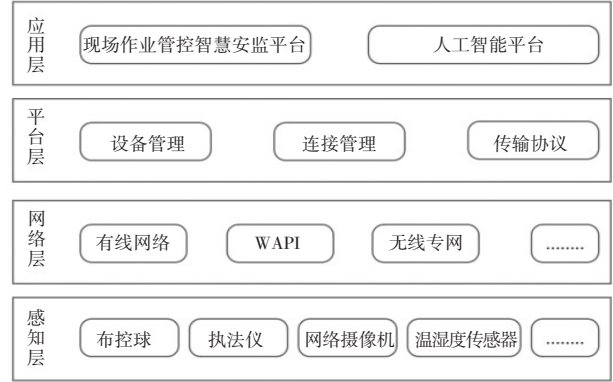


图1 云边协同架构

Fig. 1 Cloud edge collaboration architecture

感知层主要利用布控球、执法仪及布设在变电站输电铁塔的网络摄像机、温湿度传感器等感知设备,实现信息的采集、识别和汇聚;网络层主要负责在平台层、感知层之间的信息传输;平台层主要为信息采集提供统一的管控平台,将数据统一接入,为应用层提供服务;应用层主要实现业务应用的构建,例如现场作业管控智慧安监系统、人工智能平台等业务管理系统。

2 基于云边协同的智能判别技术

2.1 技术实现

1) 中心云端训练及安监算法模型。中心云端通过接收大规模传感器数据集进行算法模型的训练。以智慧安监为例,模型包含了当前安规内容及将增加的安规可以用以训练的内容,确保了监控的全面性和实时性。中心云端的高性能计算资源保障了模型的深度学习训练效果。

2) 轻量化处理及本地下载。为了在本地节点上实现实时智能判别,通过轻量化处理对模型进行精简和优化。经过处理后,将安监算法模型下发到支持算法的终端,例如智能网关,支持算法的网络摄像机及布控球,以保证在有限的本地计算资源下能高效运行。

2.2 本地节点实时智能判别

1) 视觉影像处理。本地节点可调用算法进行实时的视觉影像处理。通过先进的计算机视觉技术,实现智慧安监的识别,包括人脸采集和识别、人员位置等。

2) 违规动作智能识别。基于安规条例的动作进行深度学习模型训练,本地节点实时进行违规动作的智能识别,包括安全帽、工作服、安全带等违规动作。这确保了作业现场的安全合规。

3) 实时数据传输与反馈。本地节点通过边缘计算实

现对实时数据的即时处理,仅将关键信息传输至中心云端,减轻了数据传输压力。云端可通过反馈机制及时更新安监算法模型,确保模型的及时性和准确性。

4) 前后台互动。本地节点与云端之间实现了前后台的高效互动。通过云端的实时监控和反馈,可对本地节点进行实时调整和优化,确保在不断变化的作业环境中仍能保持高效的智能判别。

2.3 算法改进

2.3.1 快速检测网络改进(FDN)

为了适应布控球的高移动性,快速检测网络^[15-17](fast detection network, FDN)以允许它快速适应视角变化。

$$f^i(x; \theta, \omega) = \varphi(\beta(W_n \times \dots \times \varphi(\beta(W_1 \times x + \alpha(b_1, \omega)) \dots) + \alpha(b_n, \omega))) \quad (1)$$

其中, $\alpha(\cdot, \omega)$ 函数适应视角变化 ω , 校正偏置项 b 。函数 $\beta(\cdot)$ 是一个动态标准化函数,用于卷积层的输出,并自动调整网络权重以适应通过布控球移动带来的场景变化。

2.3.2 级联结构

级联结构由多个检测器组成,实现顺序应用,从粗到精对目标进行定位和识别。假设有 n 个连续的级联检测器 D_n , 第 i 个检测器可以用下列公式表示为

$$D_i(x) = \begin{cases} 1, & P(\text{obj} | x, \theta_i) > \tau_i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, P 是由第 i 级检测器计算的,给定图像 x 中包含目标的概率, θ_i 是第 i 个检测器的参数, τ_i 是决定是否将目标传递到下一级的阈值。

改进的级联结构将更能够抵抗由于布控球运动产生的动态背景,引入一个根据检测置信度实时调整阈值的策略为

$$D'_i(x) = \begin{cases} 1, & P'(\text{obj} | x, \theta_i, \eta) > \tau'_i(\rho) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, η 是与布控球当前运动状态相关的参数,使得网络能基于运动进行自我校正。 $\tau'_i(\rho)$ 是一个基于当前视频帧稳定性 ρ 实时调整的阈值。

2.3.3 姿态估计分支改进(LitePoseEst)

姿态估计可以使用热图(heatmaps)来定位关键点。对于每个关键点 k , 定义一个热图 H_k , 该热图是通过将图像 x 应用一系列的卷积网络得到的。

$$H_k(x) = \psi(W_m \times \dots \times \psi(W_1 \times x + b_1) \dots + b_m) \quad (4)$$

其中, ψ 为 sigmoid 函数,用于生成关键点的概率分布, W_i 和 b_i 是网络的权重和偏置。

$$H'_k(x, T_p) = \psi(W'_m \times \dots \times \psi(W'_1 \times [x, T_p] + b'_1) \dots + b'_m) \quad (5)$$

其中, $[x, T_p]$ 表示当前帧 x 与前一时间点的姿态信息 T_p 的结合,用以实现时序连贯性,并提高关键点定位的准确度。

2.3.4 行为分析模块

为分析可以使用时间序列模型,例如长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)^[18]。给定一串关键点位

置序列 $S = \{p_1, p_2, \dots, p_t\}$, LSTM 定义为

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, p_t] + b_f) \quad (6)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, p_t] + b_i) \quad (7)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, p_t] + b_c) \quad (8)$$

$$C_t = f_t \times C_{t-1} + i_t \times \tilde{C}_t \quad (9)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, p_t] + b_o) \quad (10)$$

$$h_t = o_t \times \tanh C_t \quad (11)$$

其中, f_t, i_t, o_t 是遗忘门、输入门和输出门的激活向量, C_t 是细胞状态, h_t 是隐藏状态, σ 是 Sigmoid 激活函数, \tanh 是双曲正切激活函数。

为了适应布控球环境的要求,行为分析模块需要对动态背景不敏感且能够从不完整的关键点序列中识别出行为。考虑引入一个注意力机制 $\Gamma(T_p)$

$$f'_t = \sigma(W_f \cdot [h'_{t-1}, p_t, \Gamma(T_p)] + b_f) \quad (12)$$

$$i'_t = \sigma(W_i \cdot [h'_{t-1}, p_t, \Gamma(T_p)] + b_i) \quad (13)$$

$$\tilde{C}'_t = \tanh(W_c \cdot [h'_{t-1}, p_t, \Gamma(T_p)] + b_c) \quad (14)$$

$$C'_t = f'_t \times C'_{t-1} + i'_t \times \tilde{C}'_t \quad (15)$$

$$o'_t = \sigma(W_o \cdot [h'_{t-1}, p_t, \Gamma(T_p)] + b_o) \quad (16)$$

$$h'_t = o'_t \times \tanh C'_t \quad (17)$$

注意力机制增加了网络对于当前和历史姿态信息的注意力,通过加权机制减弱或增强关键点序列的某些部分对行为识别的影响。

2.3.5 动态优化控制器改进(DOC)

最后,在视觉判别中,为了适应布控球的使用场景,动态优化控制器(dynamic optimization controller, DOC)需要结合环境动态性和任务的紧迫度 μ 对模型进行优化。

$$Q(s, a; \xi') = E[R_t | s_t = s, a_t = a, \mu_t = \mu] \quad (18)$$

在这里, $\mu_t = \mu$ 是一种影响决策过程的新变量,表示布控球所处环境的紧迫度。DOC 可以学习如何在需要快速反应时牺牲一些准确性以换取速度,或者在稳定情况下优先考虑准确性。

3 基于 WAPI 的智能布控球算法

3.1 云边协同的智能安监终端设备

本文布控球可以在电力系统的各个环节和场景中使用,包括发电厂、变电站、输电线路、配电网等场景的预试、检修、定检、安装、更换、消缺等工作的作业现场,以提供全方位的视频监控和安全管理。该设备的功能具体包括:

1) 具有高分辨率的图像传感器和先进的图像处理技术,能够提供清晰、细节丰富的视频图像,以确保监控画面的准确性和可靠性。

2) 具有广角摄像头、变焦摄像头和可调节的云台,可以实现全方位的监控覆盖和目标区域细节的把控。云台功能还可以远程控制并调整摄像机的方向和视角。

3) 支持网络连接,可以通过网络远程访问和控制摄像机。用户可以通过手机 APP、计算机等设备实时查看监控画面、进行控制和设置。

4) 具有智能视频分析功能,可以识别和分析监控画面中的违章行为。例如,可以实现人脸动态识别、安全帽识别、工作服识别等功能,提供及时的声光告警。

5) 支持本地存储和网络存储,可以将监控录像保存在本地存储设备或网络存储设备上。同时,它还具有数据管理功能,可以对存储的视频数据进行管理、搜索和回放。

3.2 WAPI 算法原理概述

无线局域网认证与隐私基础设施(WLAN authentication and privacy infrastructure, WAPI)是我国自主研发的无线网络网络安全标准,主要用于WLAN的安全认证和数据保密。WAPI相对于其他国际标准,如IEEE 802.11i(WPA/WPA2),提出了加强安全性的措施。该标准的诞生背景基于对数据传输过程中安全性的严格要求,尤其涉及关键基础设施的安全监控,例如无线摄像机、巡检机器人、移动布控球、执法仪等,其应用于边缘计算环境中的数据收集和传输。

1) 双向认证的算法实现。WAPI的双向认证通过公钥基础设施(PKI)实现。客户端和接入点各自拥有一对密钥,通过数字签名验证对方的身份。具体实现中,采用基于椭圆曲线密码学的数字签名算法,确保了认证的安全性和效率。

2) 安全加密算法原理。WAPI采用SMS4加密算法(SM4 block cipher algorithm, SMS4)进行数据加密,其算法原理基于分组密码和密钥扩展。SMS4采用非线性代换、置换、线性变换等结构,通过多轮迭代操作,实现对数据的高效加密。这一算法原理保障了WAPI传输的数据在无线网络中的机密性。WAPI采用SMS4算法进行数据加密,其算法原理基于分组密码和密钥扩展。SMS4采用非线性代换、置换、线性变换等结构,通过多轮迭代操作,实现对数据的高效加密。这一算法原理保障了WAPI传输的数据在无线网络中的机密性。

3) 内网接入机制。WAPI的内网接入基于动态密钥协商(DKE)协议,通过协商生成动态密钥。该协议利用Diffie-Hellman密钥交换算法,确保在内网环境中进行安全的密钥协商,从而实现用户对内部资源的安全访问。

3.3 WAPI 与智能布控球的结合

如前所述,WAPI的安全特性是确保智能布控球无线传输数据安全的关键。WAPI主要特点包括双向认证、安全加密和内网接入。

1) 双向认证机制。WAPI的双向认证是指客户端和网络不仅要验证客户端的身份,同时客户端也要验证网络的身份。这种方法可以有效地防止身份冒充和“中间人攻击”(man-in-the-middle attack, MitM)。在移动式布控球场景中,当SMSU尝试接入无线网络时,必须通过网络的认证,验证接入网络(客户端验证)权限。同样,SMSU也会验证接入点(AP)的身份(服务器验证),确保数据只在可信的网络和设备之间传输。在双向认证过程中,本文使用数字证书或预共享密钥(pre-shared key, PSK)。

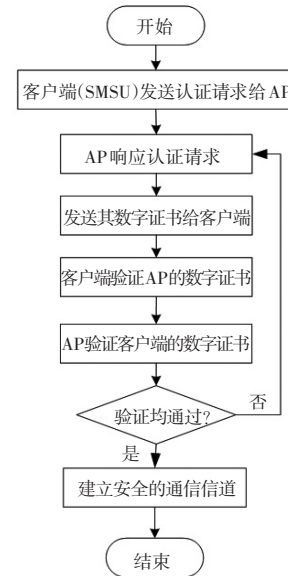


图2 双向认证流程

Fig. 2 Bidirectional authentication process

2) 安全加密技术。WAPI的安全加密采用SMS4算法,即块加密算法,用于对数据进行加密,确保数据在无线传输过程中不被未授权者读取或篡改。SMS4提供了128位安全密钥,可防止解密攻击。在SMSU的应用场景中,运用WAPI进行加密在两个层面上保护数据。

1) 数据的保密性。通过SMS4算法加密视频流和传感器数据,保证这些数据即使在被截获时也无法被未授权的第三方解读。

2) 数据的完整性。加密过程还包括对数据进行完整性校验,确保数据在传输过程中没有被篡改或损坏。

3) 内网接入控制。WAPI的内网接入机制确保只有已认证和授权的设备才能接入内网资源,需要通过和网络接入控制(network access control, NAC)策略相结合来实现,该策略基于设备编号、准入时间、位置等因素动态地控制设备的网络接入权限。

在SMSU系统中,布控球可以根据其安全级别和任务需求得到接入内部网络资源的授权。SMSU完成双向认证和加密建立后,并通过访问控制检查点,便可以访问中心数据库上传其收集的数据或从服务器下载更新。

这种配置保障了SMSU传输的数据在移动性、灵活性和高安全性之间的平衡。不仅有效防止了潜在的外部安全威胁,还对内部潜在威胁提供了保护层,确保了即使在有多层网络接入点的大型监控网络中,关键数据的安全性也不会受到威胁。

3.4 WAPI 与智能布控球算法步骤

本文提出的算法步骤如下。

1) 初始化

初始化WAPI监听服务以接收指令和发送反馈。初始化布控球的硬件接口,包括摄像头、传感器、移动机构等。

2) 无线通信建立

建立WAPI通信协议,确保布控球可以接收远程命令并发送数据。

3) 指令解析与执行

接收 WAPI 传递的指令,并解析成布控球的控制信号。根据解析出的控制信号调整布控球的行为,如移动位置、调整摄像头角度、更改监控模式等。

4) 数据采集与处理

实时捕捉视频流并应用图像处理算法,如之前讨论的快速检测网络(FDN)、姿态估计分支(LitePoseEst)等。收集环境感知数据,如温度、湿度、风速、位置、声音等。

5) 智能分析与响应

对采集的视频和环境数据进行实时分析,检测异常情况或监测特定目标。应用改进算法对检测到的物体或情况进行分类、识别和跟踪。

6) 响应控制与执行

根据分析结果通过 WAPI 发送实时反馈。若需要,控制布控球执行响应动作,如移动到特定位置、发送警报等。

7) 循环执行

循环步骤 3) 到步骤 6),直至收到停止指令。

8) 结束

断开 WAPI 通信协议。关闭布控球硬件接口。

上述伪代码如下:

```
//初始化 WAPI 接口和智能布控球硬件
initialize WAPI and SurveillanceBall
// 建立 WAPI 通信协议链接
establish WAPI communication
// 主循环,除非接收到停止命令否则一直运行
while True:
    // 接收来自 WAPI 的命令
    command = receiveCommands( WAPI)
    // 解析命令为布控球可以理解的控制信号
    controlSignals = parseCommand( command)
    // 根据控制信号执行操作,如移动、旋转等
    executeControl( SurveillanceBall, controlSignals)
    // 从智能布控球捕获最新的视频帧和传感器数据
    videoFrame, sensorData = captureData( SurveillanceBall)
    // 对视频帧应用智能分析算法进行目标检测和跟踪等
    detectionResults = performIntelligentAnalysis(videoFrame)
    //分析来自布控球传感器的环境数据
    environmentalResults = analyzeSensorData(sensorData)
    // 如果分析出结果存在,则通过 WAPI 发送结果数据
    if detectionResults or environmentalResults:
        sendResponse( WAPI, detectionResults, sensorData)
        // 根据分析结果控制布控球采取行动,例如移动到指定地点
        takeAction( SurveillanceBall, detectionResults)
    // 如果命令停止,则跳出循环,结束程序
    if command is STOP:
```

break

// 断开 WAPI 连接

disconnect WAPI

// 关闭并断开布控球的所有硬件接口

shutdown SurveillanceBall

4 实例分析

选择某地 220 kV 变电站为例,变电站内安装有多个智能布控球,可以移动并监控关键区域。云平台具有高性能计算能力,用于进行大规模数据分析和深度学习模型训练。边缘计算设备靠近智能布控球,可以快速处理传感器数据和初步分析视频流。

表 1 布控球功能

Tab. 1 Control ball function

内容	算法特点
人脸抓拍	支持
人脸识别	内置 10 万人脸库,可进行人脸比
安全帽检测	可对安全帽佩戴状态、及安全帽颜色进行识别检测
车牌检测	可对来往车辆车牌进行检测并抓拍
违章作业检测	可对抽烟行为、打电话行为及未穿工作服行为进行检测并抓拍
语音播报	支持对人脸识别结果、未戴安全帽、抽烟、打电话、未穿工作服等行为进行语音播报

实验在某地 220 kV 变电站内进行,该变电站覆盖面积为 6 500 m²。共使用 10 个智能布控球,每个布控球配有独立的传感器单元用于数据采集。现场工作人员数量为 50 人。其中,包括 10 名操作员、20 名维护工程师和 20 名安全监控人员。

实验为期一周,累计工作时间为 8 h。以上数据分布在 5 个连续的工作日内,每日进行 2 h 的测试,测试时间均匀分布于每日的工作时间内,以确保数据的连续性和一致性。

研究一周内布控球在现场作业智慧化的情况,对比使用和不使用云边协同的情况下,记录智能布控球的性能数据,包括故障诊断速率、数据处理量等。

从图 3 和图 4 的对比可以看出,含有云边协同的系统在故障诊断速率和数据处理量方面均表现出更高的效率。以故障诊断速率为例,云边协同系统的平均诊断速率为 12 次/min,标准差为 0.234;而不含云边协同系统的平均诊断速率为 6 次/min,标准差为 0.441。通过进行 *t* 检验,得到 *p* 值小于 0.05,表明云边协同系统在统计上显著提升了诊断效率。

除了故障诊断速率和数据处理量外,还测试了安全传输和智能化程度相关的指标。

1) 网络安全传输。在测试期间,监控了数据传输的加密情况,确保每个传输的数据包都符合 WAPI 标准。检测了攻击情况,在实验期间,使用渗透测试工具共进行了 100 次模拟攻击,均被成功防御。

2)智能化程度。通过识别准确率和响应时间来评估智能化程度。智能布控球在实验过程中实现了96%的识别准确率,且平均响应时间为0.5 s,能及时识别并响应现场人员违规操作。

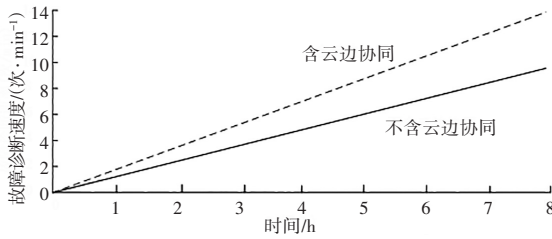


图3 故障诊断速率

Fig. 3 Fault diagnosis rate

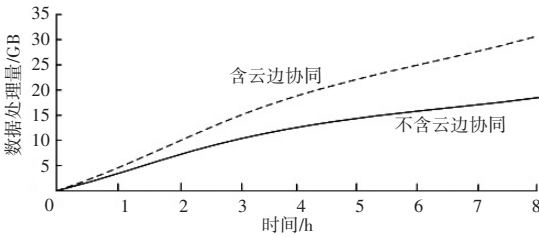


图4 数据处理量

Fig. 4 Data processing capacity

5 结论

提出的基于云边协同的电力现场作业终端智能化研究,结合云边协同架构,应用安全的 WAPI 通信,使布控球的智能化水平有了显著提高。对于现场作业而言,云边协同的智能化布控球不仅能将视频传输到智慧安监后台,便于后台人员远程监视,采用安全的接入方式,还提供了智能化手段识别现场作业过程,提高了对现场管控能力,能有效预防安全事件,降低现场作业风险,为电力现场风险管控提供了强有力的支撑。

参考文献

[1]胡玉,张腾彦.基于布控球技术的机具安全作业系统研究[J].自动化与仪器仪表,2023(6):161-165.

[2]张斌,李博文.基于布控球技术的煤矿视频监控系统研究与应用[J].中国煤炭,2022,48(增刊1):47-50.

[3]唐标,李博,刘斯扬,等.基于移动应用的布控球在变电站仪器仪表监测中的应用[J].电气应用,2020,39(12):68-73.

[4]唐标,李博,刘斯扬,等.基于分布式状态估计技术在变电站布控球实时数据分析[J].电气应用,2020,39(9):110-114.

[5]潘志敏,唐信,梁运华,等.智能穿戴设备与安监布控球联动目标跟踪方法[J].电子技术与软件工程,2021(10):230-232.

[6]周刚,田玮,李云龙,等.电力行业风险较大作业项目安全管控研究与应用[J].电工技术,2020(1):85-88.

[7]杨康萍,王隆,李仲斌,等.基于 WAPI 技术的智能电网终端通信模式研究[J].科技与创新,2023(21):38-40.

[8]谢琼香,李翔,陈滔,等.基于 WAPI 技术的安全执法仪通信模块设计[J].科技与创新,2023(20):111-113.

[9]王宇,童畅,李磊,等.云边端协同的区域智能巡视系统的研究[J].信息与电脑(理论版),2023,35(20):13-16.

[10]肖靖,曾锦松,许佳庆,等.基于云边端协同技术的电力安全管控系统设计[J].供用电,2023,40(5):44-52.

[11]汪杨凯,许悦,许涛,等.云边协同框架下结合深度学习与随机森林的电力设备识别[J].微型电脑应用,2023,39(8):106-110.

[12]陈建洪,黄运豪,林静怀,等.基于云边协同的变电站倒闸操作平台设计与实现[J].电网技术,2023,47(2):833-841.

[13]陈建洪,林文彬,夏文岳,等.基于云边协同的变电站倒闸防误操作关键技术研究[J].电力信息与通信技术,2022,20(8):91-98.

[14]江伟,马光,涂卫平,等.基于云边协同的微电网自动控制系统[J].计算机测量与控制,2023,31(12):117-122.

[15]赵志新,赵宗罗,赵颖,等.基于并行化 BP 神经网络的配电变压器故障快速诊断方法[J].浙江电力,2021,40(12):82-88.

[16]张龙,沈飞,李林林,等.基于神经网络自适应滤波器的数字化电能计量故障检测方法[J].自动化技术与应用,2024,43(4):47-50,176.

[17]包乌云毕力格.基于网络流量变化特征的物联网非法入侵检测研究[J].自动化技术与应用,2024,43(8):105-108.

[18]李凯,胡丽,宋婷婷.基于 CNN-Bi-LSTM 的锂离子电池健康状态估算[J].山东电力技术,2023,50(10):66-72.

(上接第 14 页)

[13]蒋林君.企业自动化立体仓库的应用研究[J].大众标准化,2023,(14):155-157.

[14]张丽萍,朱尧富.自动化立体仓库控制系统的设计[J].自动化技术与应用,2024,43(9):60-63,171.

[15]吕俊燕,陈福德,马龙华.自动化立体库堆垛机结构设计[J].汽车实用技术,2021,46(12):68-70.

[16]杨粉香.基于 CRITIC 法-VIKOR 模型的天津绿色物流效率评价研究[J].全国流通经济,2024(3):40-43.

[17]闫旺,谭晓伟.基于改进德尔菲法的公路货运站站级标准划分研究

[J].内蒙古公路与运输,2024(2):45-48.

[18]潘雅翔,林莉.即时配送服务质量与消费者满意度研究——基于熵值法与 IPA 分析法[J].农业展望,2024,20(4):107-114.

[19]汪辉.基于主成分分析的华中物流产业发展水平综合评价[J].中国储运,2024(2):98-99.

[20]许超,韩树成,王甫,等.基于区块链技术的分布式新能源配电网调度多目标优化[J].自动化技术与应用,2024,43(12):198-203.

[21]张荣玉.基于层次分析-聚类分析的快递企业影响力评价研究[J].物流工程与管理,2024,46(3):82-85.