

本文引用格式：潘巧,方百里,李瀚儒,等.基于体感网与边缘计算的高空作业智能防护系统研究[J].自动化与信息工程,2023,44(6):15-21.

PAN Qiao, FANG Baili, LI Hanru, et al. Research on intelligent protection system for high-altitude work based on somosensory network and edge computing[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(6):15-21.

## 基于体感网与边缘计算的高空作业智能防护系统研究\*

潘巧 方百里 李瀚儒 孙广通 叶翔

(广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510180)

**摘要:** 随着我国高空项目建设(高压电线铺设和维护、超高层建筑建设等)需求的快速增长,高空作业防护信息化、智能化水平低的问题愈发凸显。该文围绕高空作业人员安全防护场景,利用体感网随时随地感知的特点,以及边缘计算就近提供服务的技术优势,设计高空作业智能防护系统。重点设计了可充气的智能安全服、智能安全帽、智能安全扣,并针对高空作业人员定位与管理的需求,提出一种改进的 PGSA-PSO 定位算法。该系统有助于促进我国高空作业防护工作的进一步发展及提升。

**关键词:** 体感网; 边缘计算; 高空作业; 智能防护系统; 智能安全服; 智能安全帽; 智能安全扣

中图分类号: TP391.44

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2023)06-0003-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.003

## Research on Intelligent Protection System for High-altitude Work Based on Somosensory Network and Edge Computing

PAN Qiao FANG Baili LI Hanru SUN Guangtong YE Xiang

(Guangdong Power Grid Limited Liability Company Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510180, China)

**Abstract:** With the rapid growth of demand for high-altitude project construction in China, such as the laying and maintenance of high-voltage power lines and the construction of super high-rise buildings, the problem of low level of information and intelligence in high-altitude work protection has become increasingly prominent. This paper designs an intelligent protection system for high-altitude work around the safety protection scene of high-altitude workers, taking advantage of the characteristics of somatosensory network sensing at anytime, anywhere, and the technical advantages of edge computing to provide services nearby. We have focused on designing inflatable intelligent safety suit, intelligent helmet, and intelligent safety buckle, and proposed an improved PGSA-PSO positioning algorithm to meet the needs of positioning and management for high-altitude workers. This system helps to promote the further development and improvement of high-altitude work protection in China.

**Keywords:** somatosensory network; edge computing; high altitude work; intelligent protection system; intelligent security suit; intelligent safety helmet; intelligent safety buckle

### 0 引言

随着我国经济建设水平的快速提升,电力能源、建筑物、通信等需求也与日俱增,具体表现为电力线架设得越来越长、覆盖范围越来越广;建筑物越来越高、数量越来越多;通信基站容量越来越大、速度越来越快。根据国家能源局发布的数据,2021年我国特

高压累计线路长度增至 42 156 公里,与上一年相比增加了 17.52%,预计 2023 年特高压累计线路长度将达到 46 297 公里<sup>[1]</sup>。世界高层建筑与都市人居学会发布的《2022 年高层建筑年度回顾》报告显示,2022 年全球共建成 147 座 200 m 及以上的建筑,其中中国有 88 座,占比超过 50%。此外,2022 年全球还建成了 36

座 300 m 及以上的超高层建筑, 其中中国有 21 座, 占比超过 50%<sup>[2]</sup>。与之对应的, 作业人员需要在复杂的高空环境下从事高强度、快进度的作业。高空作业除了受复杂的外部环境因素(风速、温度等), 以及防护设备的影响外, 还受作业人员自身因素(安全意识、健康状况等)的影响, 致使高空作业是一项危险系数极高的活动。

为有效地防护高空作业人员的生命财产安全, 降低高空作业的风险, 学术界与产业界在已有防护设施的基础上, 结合新兴技术, 开展了深入研究。文献[3]将可充气的气囊集成到安全服中, 当高空作业人员发生意外坠落时, 会触发气囊充气, 起到一定的保护作用。文献[4]围绕变电站施工作业人员构建了一套安全管控及评价系统, 虽然可以提升人员安全管控的科学性与合理性, 但缺乏相应的安全提醒与防护功能。文献[5-6]分别基于 YOLOv3 和 FPN-CenterNet 神经网络对施工人员是否规范佩戴安全帽展开研究, 并得到相应的检测模型。这些方法虽然在一定程度上提升了高空作业人员的保护力度, 但在实用性、算法的复杂度上还有待改进。

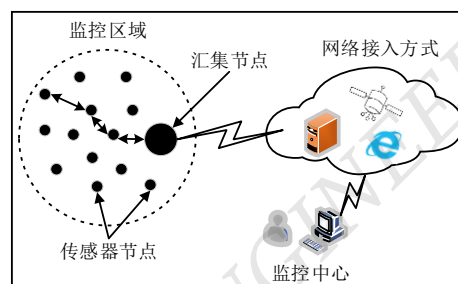
本团队曾基于多模态技术构建了一种新型的智能安全服<sup>[7]</sup>。在此基础上, 为更加全面地对高空作业人员进行保护, 提升我国高空作业防护的信息化、智能化水平, 本文将无线体感网和边缘计算引入高空作业防控系统的研究。首先, 简单介绍体感网、边缘计算的技术概念及基本架构; 然后, 围绕高空作业防护场景, 通过融合体感网与边缘计算的技术优势, 设计高空作业智能防护系统; 最后, 阐述高空作业智能防护系统的软、硬件设计。

## 1 体感网与边缘计算概述

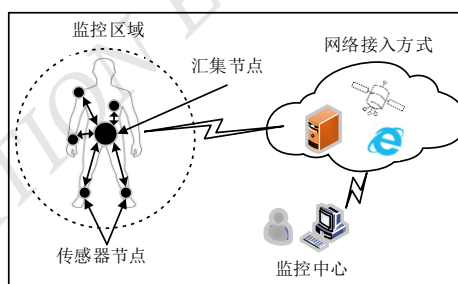
### 1.1 从无线传感器网络到无线体感网

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)是由部署在目标监控区域内大量的微型传感器节点通过无线通信的方式形成的一种特殊 Ad-hoc 网络<sup>[8-9]</sup>。WSN 的体系结构如图 1(a)所示, 用于监视和记录目标监控区域的物理状况, 如温度、声音、污染

程度、湿度、风速等。作为无线传感器网络的重要组成部分, 无线体感网(wireless body sensor network, WBSN)是由佩戴在人体不同部位的传感器构成的人体区域传感器网络, 主要对人体行为、生理参数进行检测<sup>[10]</sup>, 其体系结构如图 1(b)所示。



(a) WSN 体系结构



(b) WBSN 体系结构

图 1 WSN 和 WBSN 的体系结构

从图 1(a)可以看出: 首先, WSN 通过传感器节点对目标监控区域进行数据采集; 然后, 将采集的数据传输到汇集节点, 通过卫星、移动蜂窝网等与云端和监控中心进行通信; 最后, 通过部署在云端或监控中心的服务器进行数据分析, 实现目标监控区域的无线感知<sup>[11]</sup>。

通过图 1(b)与(a)的比较可以看出, WBSN 是围绕人体进行感知的 WSN, 目标对象与监控区域主要是人及与人密切相关的空间, 具体差异主要包括以下几个方面:

1) 监控对象与监控区域不同, WSN 主要针对恶劣的、人无法到达的区域进行监控, 监控区域较大; WBSN 主要针对人以及人所处的周边环境进行监控, 如居家场所、办公区域, 监控区域较小;

2) 节点数量不同, WSN 监控区域比 WBSN 大,

因此需要更多的传感器节点和汇聚节点，达到成千上万个；WBSN 一般只需要几个、十几个传感器节点和汇聚节点；

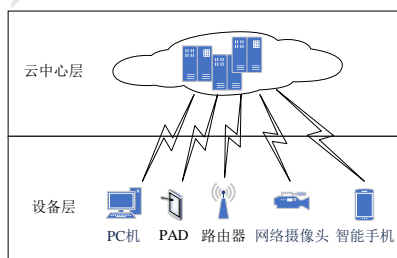
3) 监控内容不同，WSN 主要关注外部环境，如气温、湿度、土壤 pH 值、噪声等；WBSN 主要采集人的生理参数（体温、脉搏、呼吸等）、行为动作以及居住场所的环境信息等；

4) 电源续航能力要求不同，WSN 的节点是随机甚至抛散的方式部署在恶劣环境中，回收极不方便，需保持较长的续航能力，如达数年之久；WBSN 的采集设备容易接触，对续航能力的要求不高；

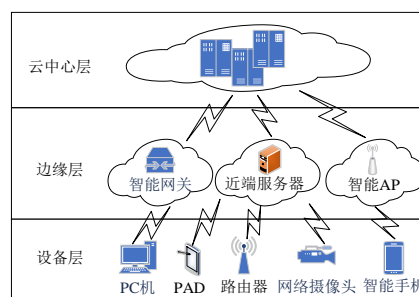
5) 设备安全性要求不同，虽然 WSN、WBSN 都要求节点对环境尽可能无害，但 WBSN 的设备直接佩戴在人身上，其安全要求更高。

## 1.2 从集中式的云计算到分布式的边缘计算

云计算通过互联网提供计算资源和服务<sup>[12-13]</sup>，基于虚拟化技术和分布式计算原理，将计算能力、存储资源和应用程序等提供给用户，以满足需求。云计算具有资源共享、弹性伸缩、按需自助服务等特点，主要有 3 种服务模式：基础设施即服务（infrastructure as a service, IaaS）、平台即服务（platform as a service, PaaS）、软件即服务（software as a service, SaaS）<sup>[14]</sup>。云计算的架构如图 2(a)所示。随着万物互联时代的到来，出现了一种新型的计算模式——边缘计算<sup>[15]</sup>。边缘计算产业联盟把边缘计算定义为：“在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的开发平台，就近提供边缘智能服务，满足行业数字化在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求”<sup>[16-17]</sup>。边缘计算的架构如图 2(b)所示。



(a) 云计算架构



(b) 边缘计算架构

图 2 云计算架构与边缘计算架构比较

通过图 2(a)与(b)的比较发现，边缘计算是在云计算的云中心层与设备层之间插入边缘层，将云服务的部分处理任务迁移到此层，而原有云计算的设备层、云中心层的功能不变。边缘计算各层的功能分别为：设备层靠近事件源，主要由各种传感器组成，负责数据的采集与感知；边缘层位于网络边缘，由智能网关、近端服务器等组成，负责部分云中心层的数据分析任务，以及设备层与云中心层之间的数据传输；云中心层由服务器集群构成，负责复杂数据的处理、存储、呈现等任务。

传统的集中式云计算模式存在实时性不强、带宽不足、能耗大、安全及隐私等问题。分布式边缘计算通过引入边缘层，可就近对数据进行处理，提供实时响应，无需将全部的原始数据上传到云计算中心，降低了带宽开销。但边缘计算不是云计算的替代，而是一种补充<sup>[18]</sup>。

## 2 高空作业智能防护系统的硬件设计

WSN 和 WBSN 侧重于目标监控区域和目标对象的数据采集与感知；云计算和边缘计算主要提供数据处理与存储所需的资源。高空作业场景需要监控的目标对象是高空作业人员，同时要求实时响应异常情况的处理，如发生坠落事件时，需要及时采取防护措施和开展救援工作。因此，本文借助 WBSN 提供的数据感知功能和边缘计算提供的就近服务技术优势，研究高空作业智能防护系统，打造全方位高空作业智能防护“三件套”（智能安全服、智能安全帽、智能安全

扣)，系统架构图如图 3 所示。

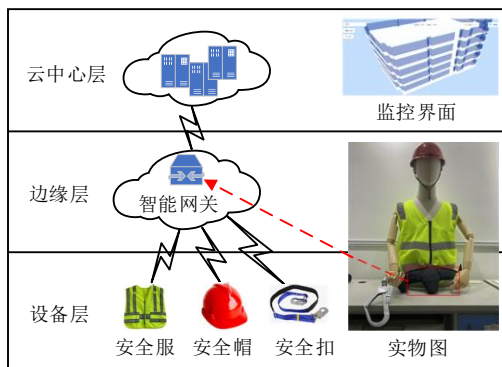


图 3 高空作业智能防护系统架构图

高空作业智能防护系统的设备层由智能安全服、

智能安全帽、智能安全扣组成，穿戴于高空作业人员身上，用于监控其工作状态信息；边缘层由具有数据透传和存储功能的智能网关组成，用于接收、转发设备层采集的数据流，同时就近提供简单的数据处理服务；云中心层部署了一套监控系统，用于综合数据的分析与结果呈现。特别指出，智能安全服、智能安全帽、智能安全扣均可以独立工作，不依赖智能网关与云中心，更大程度地保证防护的可靠性。

## 2.1 智能安全服

智能安全服包括微控制器模块、采集模块、电源模块、保护模块、提醒模块和通信模块等，其架构图、示意图等如图 4 所示。



(a) 智能安全服架构图

(b) 智能安全服示意图

(c) 电子气体发生装置

图 4 智能安全服

1) 微控制器模块：选用 STM32L152RBT6 作为处理器，对采集模块传输的运动数据进行快速、实时地分析，判断高空作业人员是否发生坠落，并将分析的结果数据作为唤醒保护模块和提醒模块的依据；同时与通信模块进行连接，将分析的结果数据上传到边缘层。

2) 采集模块：选用 MPU9250 九轴传感器作为采集模块，采集高空作业人员实时的运动数据，并通过 I<sup>2</sup>C 总线传输到微控制器模块进行分析。

3) 通信模块：采集模块获取的运动数据、微控制器模块分析的结果数据，通过通信模块上传到边缘层，进而传输到云计算中心。根据高空作业防护对设备功耗的要求，本文选择 ZigBee 作为设备层与边缘层的通信方式，芯片选用 CC2530。

4) 保护模块：本文设计的智能安全服具有坠落

保护的功能，其集成了可充气的安全气囊（如图 4(b) 所示）。当发生坠落或人为触发时，通过电子气体发生装置（如图 4(c) 所示）进行充气，保护高空作业人员的头部、躯干等重要部位。

5) 提醒模块：主要包括 1 个 TMB12A 蜂鸣器和 1 个 LED 灯，在坠落、电池电量不足等异常情况发生时，其会做出相应的提醒。

6) 电源模块：主要由正电压调整器 XC6210B332MR 和可充电锂电池 LGS4084 组成，负责对上述模块供电。

## 2.2 智能安全帽

安全帽是保障高空作业人员头部的重要装备。在高空作业过程中，以及处于高空作业现场时，都需要严格按照要求正确佩戴安全帽。智能安全帽的架构图、示意图等如图 5 所示。

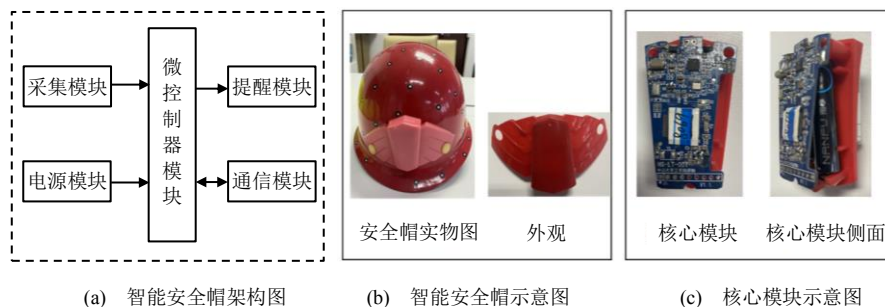


图5 智能安全帽

智能安全帽主要包括微控制器模块、采集模块、电源模块、提醒模块和通信模块。其中，微控制器模块、提醒模块和通信模块与智能安全服的功能相同，选用的芯片也基本一致。采集模块除了采用运动传感器外，还采用了振动传感器，通过这两种传感器采集的信息来分析判断高空作业人员是否正常佩戴智能安全帽，并将分析的结果数据通过边缘层的汇集节点上传到云计算中心。智能安全帽除了用于判断是否佩戴之外，还借助定位算法估算高空作业人员的位置信

息，用于人员的作业管理。

### 2.3 智能安全扣

高空作业人员经常在悬挂的状态下工作，佩戴安全绳和挂好安全扣尤为重要。但由于自身疏忽，或者觉得影响正常操作，经常有高空作业人员只挂一个安全扣，甚至一个安全扣都不挂，存在严重的安全隐患。智能安全扣可检测是否扣好、扣全，其架构图、示意图等如图6所示。

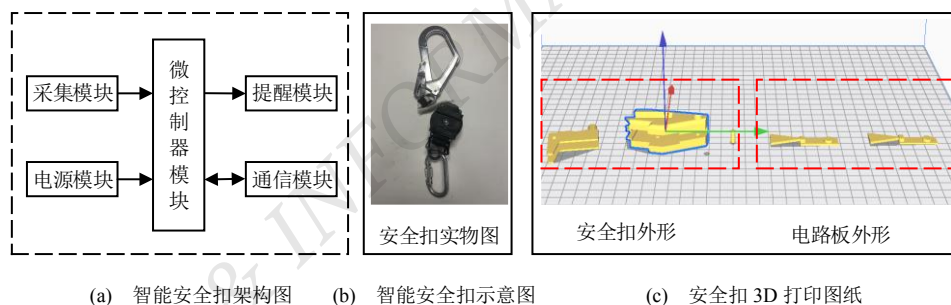


图6 智能安全扣

智能安全扣主要包括微控制器模块、采集模块、电源模块、提醒模块和通信模块。其中，微控制器模块、提醒模块和通信模块与智能安全服的功能相同，选用的芯片也基本一致。采集模块主要利用压力传感器感知智能安全扣是否受力，进而判断是否正常扣挂。

## 3 高空作业智能防护系统软件设计

高空作业智能防护系统软件功能主要包括临近事件源的防护任务（智能安全服充气防护、智能安全帽和智能安全扣是否佩戴检测）、云中心层的综合防护任务（高空作业人员定位）。关于临近事件源的防

护任务的设计与实现，可查看本团队已发表的文章<sup>[7]</sup>。本文重点针对高空作业人员定位服务展开研究。

### 3.1 基于 ZigBee 的高空作业人员定位算法

在智能安全服、智能安全帽、智能安全扣中都包含 ZigBee 通信模块，利用其提供的无线信号信息，可进行高空作业人员的定位。高空作业人员定位是一个综合性的管理问题，一般在云中心层进行。高空作业人员定位可看作是最优化问题，利用粒子群优化（particle swarm optimization, PSO）算法<sup>[19-22]</sup>进行求解，但 PSO 算法易陷入局部最优。为了让粒子跳出局部最优，寻找出全局最优值，本文将模拟植物生长算

法 (plant growth simulation algorithm, PGSA) 的思想与 PSO 算法融合, 提出一种改进的模拟退火算法—PGSA-PSO 定位算法, 即将 PGSA 的生长算子和选择算子加入 PSO 算法。生长是由一个粒子生长出多个粒子; 选择是根据粒子的适应度计算其对应的概率区间, 然后产生一个随机数, 当这个随机数落入该概率区间, 该区间对应的生长点就有优先生长的机会。

PGSA-PSO 定位算法具体过程如下:

S1: 初始化粒子群, 包括种群大小 Size、解空间维度 D、惯性因子的最大值、最小值, 最大速度、最大位移限制、最大迭代次数;

S2: 初始化粒子开始的速度和位移, 根据选择的目标函数进行适应度值计算;

S3: 确定初始个体的最优值 pbest, 群体的最优值 gbest;

S4: 更新惯性因子, 实现惯性权值因子的非线性减小, 每个粒子的速度和位移也进行更新;

S5: 计算每个粒子的适应度值, 找出适应度值最大的粒子;

S6: 模拟植物生长算子的操作流程, 最优粒子直接进入下一次迭代, 其余粒子执行模拟植物生长过程;

S7: 计算新的粒子群中每个粒子的历史最优和群体的全局最优, 若当前粒子的适应度值优于历史值, 就对该粒子的个体最优值 pbest 进行替换, 如果某个粒子的个体历史最优值 pbest 优于全局的适应度值, 则将这个粒子的 pbest 作为当前的 gbest, 记录每次迭代寻找到的全局最优位置信息;

S8: 判断是否达到设定的迭代次数或者要达到的精度; 如果达到则跳出循环, 输出结果; 如未达到, 则跳到第 S4 步, 继续迭代。

### 3.2 PGSA-PSO 定位算法模拟仿真

本文仿真环境为 20 m×20 m 的平面室内区域, 在该区域中随机布置 5 个已知位置的信标节点, 假设每个信标节点的通信范围都覆盖了整个定位区域。随机产生 20 个未知节点, 通过 PGSA-PSO 定位算法计算这 20 个未知节点的坐标。不考虑具体的测距方式、

测距过程中存在的误差, 即  $\hat{d}_i = d_i + n_i$  ( $n_i$  为高斯噪声)。

为了评估定位效果, 以 20 个未知节点定位误差的平均值  $E_N$  为评估指标:

$$E_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \text{sqrt} \left( (x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2 \right) \right) \quad (1)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  为未知节点的真实坐标,  $(\hat{x}_i, \hat{y}_i)$  为未知节点的估计坐标,  $N$  为未知节点的数量。

为了验证 PGSA-PSO 定位算法与 PSO 算法在不同噪声环境下的定位效果, 使噪声方差从 0.1 开始, 以 0.1 的步进逐步增加至 1.0。为进一步减小实验误差, 在每个噪声环境下, 多次进行定位, 并取多次定位误差的平均值, 实验结果如图 7 所示。

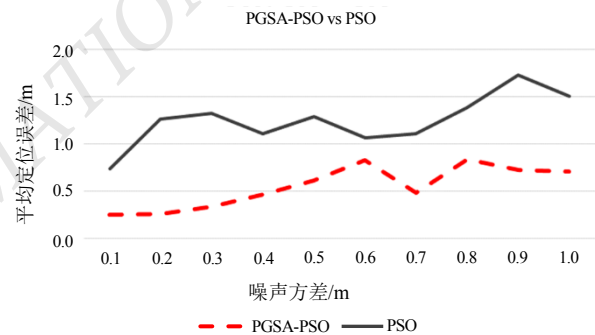


图 7 PGSA-PSO 定位算法与 PSO 算法定位效果比较

由图 7 可知: PGSA-PSO 定位算法的定位误差比 PSO 算法小, 且都小于 1 m; PSO 算法的定位误差只有在噪声方差为 0.1 时才小于 1 m, 表明 PGSA-PSO 定位算法比 PSO 算法具有更好的定位效果。

### 3.3 高空作业人员定位监控可视化实现

为了直观地在云中心监控中心查看高空作业人员的位置信息, 对设备层上传的数据用 PGSA-PSO 定位算法进行位置计算, 并将结果实时显示到高空作业智能防护系统, 可视化效果如图 8 所示。

由图 8 可知, 通过 PGSA-PSO 定位算法, 能够实时监控高空作业人员的位置, 有效预防因位置不清或误操作导致的安全风险; 且在出现紧急情况时, 能迅速定位高空作业人员的位置, 进行及时救援。

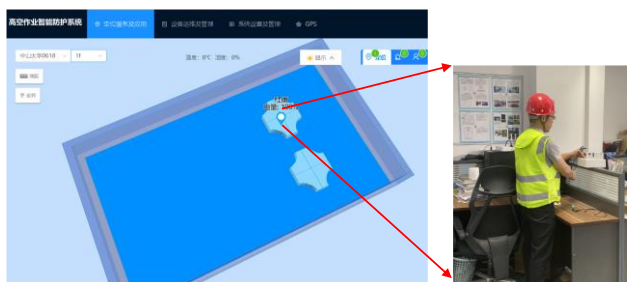


图8 高空作业智能防护系统定位监控

## 4 结论

本文围绕高空作业场景,利用体感网的实时数据采集功能,以及边缘计算的就近提供服务的技術优势,设计了高空作业智能防护系统,包括设备层的智能安全服、智能安全帽、智能安全扣,以及云中心层的PGSA-PSO定位算法。该高空作业智能防护系统有助于提升我国高空作业的信息化与智能化水平,后续将进一步研究在其他领域的应用。

## 参考文献

- [1] 张楠.我国新型电力系统建设全面启动[N].中国工业报.2023-06-06.
- [2] 世界高层建筑与都市人居学会.2022年高层建筑年度回顾[R].<https://www.ctbuh.org/resources/papers/download/4034-2022-year-in-review-tall-trends-of-2021-cn.pdf>.
- [3] 赵文超,于晓春,张武,等.带安全气囊的高空作业安全服研究[J].工业安全与环保,2019,45(3):28-31.
- [4] 吕学宾,李岩,李英,等.变电站施工作业人员安全管控及评价系统研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(4):21-27.
- [5] 屈文谦,邱志斌,廖才波,等.基于YOLOv3的电网作业人员安全帽佩戴检测[J].中国安全生产科学技术,2022,18(2):214-219.
- [6] 赵江河,王海瑞,吴蕾.FPN-CenterNet安全帽佩戴检测算法[J].计算机工程与应用,2022,58(14):114-120.
- [7] 张明,李昌镐,梁森,等.一种基于多模态技术的施工智能安全服研究[C]//2020年工业建筑学术交流会议论文集(下册),

## 作者简介:

潘巧,男,1988年生,工学学士,高级工程师,主要研究方向:输电生产运维技术。E-mail: 532315745@qq.com

方百里,男,1992年生,工学学士,工程师,主要研究方向:输电线路安全管理。

李瀚儒,男,1983年生,工学硕士,高级工程师、技术专家,主要研究方向:输电线路运行管理。

孙广通,男,1983年生,工学学士,工程师,主要研究方向:供电企业安全监管和应急管理。

叶翔(通信作者),男,1984年生,工学硕士,工程师,主要研究方向:输电线路运维、安全管理。E-mail: yexiang84@163.com

2020-11,中国北京:[出版社不详],2020:1727-1731.

- [8] ESTRIN D, GOVINDAN R, HEIDEMANN J, et al. Next Century Challenges: Scalable Coordination in Sensor Networks [C]//1999.DOI:10.1145/313451.313556.
- [9] 马祖长,孙怡宁,梅涛.无线传感器网络综述[J].通信学报,2004(4):114-124.
- [10] 梁园.基于体感网的人体运动监测动作识别研究[J].自动化与仪器仪表,2016(10):219-220.
- [11] GAYNOR M, WELSH M, ROWAN A, et al. Wireless Sensor Network Applications[C]//Americas Conference on Information Systems.DBLP, 2004.
- [12] WEINHARDT C, ANANDASIVAM A, BLAU B, et al. Cloud computing—a classification, business models, and research directions[J]. Business & Information Systems Engineering, 2009,1:391-399.
- [13] 张浩.云计算环境下的电力任务节能调度方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):128-134.
- [14] SHEN Y, LI Y, WU L, et al. Cloud computing overview[M]//Enabling the New Era of Cloud Computing: Data Security, Transfer, and Management. IGI Global, 2014: 1-24.
- [15] 施巍松,孙辉,曹杰,等.边缘计算:万物互联时代新型计算模型[J].计算机研究与发展,2017,54(5):907-924.
- [16] 丁春涛,曹建农,杨磊,等.边缘计算综述:应用,现状及挑战[J].中兴通讯技术,2019,25(3):6. DOI:10.12142/ZTETJ. 201903001.
- [17] 黄冬梅,何立昂,孙锦中,等.基于边缘计算的电网假数据攻击分布式检测方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):1-9.
- [18] 施巍松,张星洲,王一帆,等.边缘计算:现状与展望[J].计算机研究与发展,2019,56(1):69-89.
- [19] 吴建锋,徐振宇,蒋震.无线传感器网络中改进粒子群优化DV-Hop算法的研究[J].传感技术学报,2022,35(6):825-830.
- [20] 王一,宋志伟,王祎泽,等.基于PSO优化神经网络和空间网格的机器人位姿标定方法[J].中国测试,2016,42(8):98-102.
- [21] 徐晓鸣,邓裕琪,吴绮萍.基于SLP和粒子群算法的车间布局优化研究[J].机电工程技术,2020,49(2):17-20;98.
- [22] 伍建军,朱迅,吴思倩,等.基于聚类分析法和粒子群算法的柔顺定位平台优化设计[J].机床与液压,2020,48(23):99-103.