Design of Cloud-Edge Fusion Based Command System for Power Construction Front Line*

HE Ning'an*, FENG Qiangqiang, YANG Liming, LIU Baolong, LIU Jingliang, LU Guoxing
(Nanning Bureau, UHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Nanning Guangxi 530021, China)

Abstract: To address the issues of low efficiency and high safety risks in power construction site management, an intelligent command system based on cloud-edge fusion is proposed. The system adopts a collaborative architecture of cloud computing and edge computing, constructing six core modules, i.e., construction operation management, video terminal management, intelligent device management, transmission line tower management, data analysis, and safety management. The construction operation management module optimizes task scheduling through a multi-source information fusion situational awareness algorithm. The video terminal management module employs adaptive encoding parameter adjustment and anomaly detection algorithms to achieve real-time image analysis. The intelligent device management module monitors equipment status based on a health index evaluation function and time-series prediction models. The tower management module utilizes a comprehensive risk assessment model for 3D solution simulation. The data analysis module applies a multi-dimensional data fusion algorithm to enable multi-faceted data mining. The safety management module integrates fault detection models and energy assurance algorithms to provide AI-powered risk warnings. Case validation demonstrates that the system reduces data transmission latency by 30%, achieves a risk identification accuracy of 92%, and improves the average response time of functional modules by 76.8%, effectively enhancing the intelligence level of construction management.

Key words: cloud-edge fusion; power transmission lines; construction management; intelligent decision-making; real-time monitoring
EEACC: 7220; 8110B **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.03.029

基于云边融合的电力施工前线指挥系统设计*

何宁安*, 冯强强, 杨黎明, 刘宝龙, 刘景亮, 陆国星
(中国南方电网有限责任公司超高压输电公司南宁局, 广西 南宁 530021)

摘 要: 针对电力施工现场管理效率低、安全风险高的问题, 提出基于云边融合的智能指挥系统。系统采用云计算与边缘计算协同架构, 构建施工作业管控、视频终端管理、智能设备管理、输电线路杆塔管理、数据分析和安全管控六大核心模块。施工作业管控模块通过多源信息融合态势感知算法实现任务调度优化; 视频终端管理模块采用自适应编码参数调整和异常检测算法实现实时图像分析; 智能设备管理模块基于健康指数评估函数和时序预测模型实现设备状态监测; 杆塔管理模块利用综合风险评估模型实现三维方案仿真; 数据分析模块运用多元数据融合算法实现多维度数据挖掘; 安全管控模块集成故障检测模型和能源保障算法实现 AI 风险预警。实例验证表明, 系统降低数据传输延迟 30%, 风险识别准确率达 92%, 功能模块响应时间平均提升 76.8%, 有效提升施工管理智能化水平。

关键词: 云边融合; 电力输电线路; 施工管理; 智能决策; 实时监控
中图分类号: TM714 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)03-0680-07

电力输电线路是电力系统的重要组成部分, 其建设和维护工作直接关系到电网的安全稳定运行。电力输电线路施工具有地域分散、环境复杂、安全风险高等特点, 给施工现场的管理和监控带来了巨大挑战。传统的电力施工管理模式主要依靠人工巡检和纸质记录, 难以满足实时监控、快速响应和科学决策的需求, 导致施工效率低下、安全风险控制不足等问题。随着信息技术的快速发展, 云计算和边缘计算为电力施工管理提供了新的解决思路。云计算具有强大的计算和存储能力, 可支持复杂的数据分析和全局调度; 而边缘计算将计算能力下沉到数据源头附近, 实现低延迟、高实时性的处理。云边融合架构结合了两者的优势, 特别适合电力施工这类既需要实时响应又需要全局决策的场景。

项目来源: 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司科技项目(Z-LFL-20231218-004)
收稿日期: 2025-05-14 **修改日期**: 2025-08-07

近年来,电力输电线路施工管理和云边融合技术的相关研究取得了一系列进展。

在电力施工管理方面,文献[1]提出了基于物联网技术的输电线路施工监控系统,实现了施工现场的远程监测,但缺乏实时数据分析能力。文献[2]研究了输电线路工程施工安全管理信息系统,重点关注安全风险预警,但系统实时性不足。文献[3]开发了基于 GIS 的输电线路施工管理平台,提高了施工管理的可视化水平,但平台对网络依赖性强。

在云计算应用方面,文献[4]探讨了云计算在电力系统中的应用架构,文献[5]研究了电力大数据分析的云平台设计,文献[6]提出了面向电力监控的云服务框架,这些研究促进了云计算在电力行业的应用,但在网络不稳定的现场环境下性能受限。

边缘计算方面,文献[7]分析了边缘计算在工业互联网中的应用模式,文献[8]研究了边缘计算在实时监控系统中的应用,这些研究验证了边缘计算的低延迟优势,但面临计算能力有限的问题。在云边融合技术方面,文献[9]提出了面向工业互联网的云边协同架构,文献[10]设计了云边融合的实时数据处理框架,文献[11]研究了云边协同环境下的资源优化分配策略,这些研究为云边融合技术提供了理论基础。此外,文献[12]和文献[13]分别从任务调度和容错机制角度探讨了云边融合系统的优化方法。

现阶段研究存在的主要问题包括:首先,现有电力施工管理系统多基于单一架构,难以同时满足实时性和分析能力需求;其次,大多数研究集中在技术层面,缺乏对电力施工实际业务特点的深入考虑;再次,现有云边融合研究较少涉及电力施工这类特殊场景的应用;第四,缺乏针对电力施工现场复杂多变环境的资源优化策略和智能决策模型;最后,现有研究往往侧重于系统设计,缺乏实际应用效果的量化分析和验证。

基于上述问题,本文提出了一种基于云边融合的电力输电线路生产前线指挥系统设计方案。该系统采用云边协同架构,将数据采集与初步处理放在边缘侧,深度分析与全局调度由云端完成,形成优势互补的协作模式。系统包含施工作业管控、视频终端管理、智能设备管理、输电线路杆塔管理、数据分析和安全管控六大功能模块,全面覆盖电力施工管理需求。本文重点研究云边融合架构设计与资源优化模型、生产前线智能决策模型,详细阐述系统架构设计与功能实现,并通过实例分析验证系统的有效性,为电力输电线路施工管理提供新的解决思路和技术支撑。

1　基于云边融合的资源优化模型

1.1　资源优化配置数学模型

基于云边融合架构,构建了边缘计算资源利用率优化模型。设边缘节点共有 m 个,每个节点的计算能力为 C_j,当前负载为 L_j,则边缘计算资源利用率可表示为:

$$\eta_{\text{edge}}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\frac{L_j}{C_j} \tag{1}$$

为提高资源利用率,同时确保任务的服务质量,建立资源优化目标函数:

$$F=\max\{\eta_{\text{edge}}\} \tag{2}$$

$$\sigma\leqslant\sigma_{\text{th}} \tag{3}$$

式中:σ 表示各节点负载均衡度,σ_{th} 为负载均衡阈值,σ 定义为:

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\left(\frac{L_j}{C_j}-\eta_{\text{edge}}\right)^2} \tag{4}$$

当系统中有 n 个任务需要调度时,定义任务分配变量 x_i,如果任务 i 分配给边缘节点 j 取 1,否则取 0。

针对时延敏感型任务,构建了任务优先级与时延预测模型:

$$P_i=\frac{\alpha D_i+\beta U_i}{T_i^{\max}-T_i^{\text{curr}}} \tag{5}$$

式中:P_i 表示任务 i 的优先级,D_i 表示任务难度,U_i 表示紧急程度,$T_i^{\max}$ 表示最大容忍时延,T_i^{curr} 表示当前已耗时间,α 和 β 为权重系数且 $\alpha+\beta=1$。

1.2　通信优化与数据流调度模型

在云边融合架构中,通信效率直接影响系统性能。设计了设备信息传输可靠性模型:

$$R_{\text{trans}}=\prod_{i=1}^{n}\left[1-(1-r_i)^{k_i}\right] \tag{6}$$

式中:R_{trans} 表示整体传输可靠性,r_i 表示第 i 种通信方式的可靠性,k_i 表示第 i 种通信方式的冗余度。

针对网络带宽波动情况,构建了动态带宽分配模型:

$$B_i=B_{\text{base}}\left(\frac{P_i}{\sum_{j=1}^{n}P_j}\right)^{\gamma}\left(\frac{D_i}{\sum_{j=1}^{n}S_j}\right)^{1-\gamma} \tag{7}$$

式中:B_i 表示分配给任务 i 的带宽,B_{base} 表示可用总带宽,P_i 表示任务优先级,D_i 表示数据量,γ 为优先级权重系数。

为解决网络延迟和抖动问题,引入了数据传输

延迟预测模型：

$$T_{\text{delay}}=\frac{S}{B}+T_{\text{prop}}+T_{\text{proc}}+T_{\text{que}} \tag{8}$$

式中：T_{delay}表示总延迟，S 表示数据大小，B 表示带宽，T_{prop}表示传播延迟，T_{proc}表示处理延迟，T_{que}表示排队延迟。

1.3 边缘容错与能源管理模型

为保证系统稳定运行，设计了边缘节点故障检测与恢复机制，故障检测准确率模型为：

$$A_{\text{det}}=\frac{\text{TP}+\text{TN}}{\text{TP}+\text{TN}+\text{FP}+\text{FN}} \tag{9}$$

式中：TP 表示真正例（正确检测到故障），TN 表示真负例（正确判断为正常），FP 表示假正例（误报），FN 表示假负例（漏报）。

系统恢复时间预测模型为：

$$T_{\text{rec}}=T_{\text{det}}+T_{\text{diag}}+T_{\text{rep}}+T_{\text{rest}} \tag{10}$$

式中：T_{det}表示故障检测时间，T_{diag}表示故障诊断时间，T_{rep}表示修复时间，T_{rest}表示重启时间。

针对前线指挥车的能源供给问题，引入能源供给保障模型：

$$T_{\text{backup}}=\frac{C_{\text{batt}}V\eta_{\text{conv}}}{P_{\text{sys}}} \tag{11}$$

式中：T_{backup}表示后备电源供电时间，C_{batt}表示电池容量，V 表示系统电压，η_{conv}表示能量转换效率，P_{sys}表示系统功耗。

2 生产前线智能决策模型

基于第 1 节构建的云边融合资源优化模型，本节进一步研究生产前线的智能决策机制。智能决策模型以资源优化模型为基础支撑，充分利用第 1 节中的资源配置优化结果、通信调度策略和容错机制，实现更高层次的业务决策智能化。具体而言，资源优化模型为智能决策提供了计算资源保障和通信带宽分配基础，而智能决策模型则在此基础上实现施工态势感知、视频智能分析、设备预测性维护和安全风险预警等核心功能，两者形成递进关系。

2.1 施工态势感知与评估模型

生产前线指挥系统的智能决策首先基于对施工态势的准确感知与评估。提出多源信息融合的施工态势评估模型：

$$\text{SA}=f(I_{\text{cir}},I_{\text{pers}},I_{\text{dev}},I_{\text{wea}},I_{\text{ala}}) \tag{12}$$

式中：SA 表示施工态势评估结果，I_{cir}表示线路信息，I_{pers}表示人员信息，I_{dev}表示设备信息，I_{wea}表示天气信息，I_{ala}表示告警信息，$f(\cdot)$表示融合函数。

通过对历史施工数据的分析，构建融合函数如下：

$$f(I)=\sum_{i=1}^{k}w_i g_i(I_i) \tag{13}$$

式中：I 表示信息向量，$g_i(\cdot)$表示第 i 类信息的评估函数，w_i 为权重系数且其和为 1。

基于态势评估结果，任务优先级排序模型如下：

$$P(T_i)=w_1U(T_i)+w_2D(T_i)+w_3R(T_i) \tag{14}$$

式中：$P(T_i)$表示任务 T_i 的优先级得分，$U(T_i)$表示紧急度，$D(T_i)$表示困难度，$R(T_i)$表示资源需求，w_1、w_2、w_3 为权重系数且 $w_1+w_2+w_3=1$。

2.2 视频分析与异常检测模型

视频监控是电力施工现场管理的重要手段。为提高视频分析效率，自适应视频编码参数调整模型计算公式如下：

$$Q_p(t)=Q_{\text{base}}\left[1+\alpha\frac{B_{\text{ava}}(t)}{B_{\max}}+\beta\frac{C_{\text{ava}}(t)}{C_{\max}}\right] \tag{15}$$

式中：$Q_p(t)$表示 t 时刻的量化参数，Q_{base}表示基础量化参数，$B_{\text{ava}}(t)$和 $B_{\max}$分别表示当前可用带宽和最大带宽，$C_{\text{ava}}(t)$和 $C_{\max}$分别表示当前可用计算资源和最大计算资源，α 和 β 为调节系数。

2.3 设备状态评估与故障预测模型

针对终端设备状态监控，设备健康指数评估采用以下函数：

$$H(D_i)=\sum_{j=1}^{m}w_j\cdot h_j(D_i) \tag{16}$$

式中：$H(D_i)$表示设备 D_i 的健康指数，$h_j(D_i)$表示第 j 项健康因素的评分，w_j 为权重系数且其和为 1。

设备故障预测采用基于历史数据的时序预测模型：

$$\hat{y}(t+\Delta t)=f(y(t),y(t-1),\cdots,y(t-n+1),x(t)) \tag{17}$$

式中：$\hat{y}(t+\Delta t)$表示 Δt 时间后的设备状态预测值，$y(t-i)$表示历史状态值，$x(t)$表示当前环境特征向量，$f(\cdot)$表示预测函数。

2.4 输电线路杆塔风险评估模型

为评估杆塔的风险状态，综合风险评估模型如下：

$$R(T_i)=P(T_i)\cdot C(T_i)\cdot V(T_i) \tag{18}$$

式中：$R(T_i)$表示杆塔 T_i 的风险等级，$P(T_i)$表示故障概率，$C(T_i)$表示故障后果严重程度，$V(T_i)$表示杆塔易损性。

杆塔故障概率与使用年限、环境条件和负载情况相关，可表示为：

$$P(T_i)=1-\mathrm{e}^{-\lambda_0\cdot f_{\text{age}}(t)\cdot f_{\text{env}}(E)\cdot f_{\text{load}}(L)} \tag{19}$$

式中：λ_0 表示基准故障率，$f_{\text{age}}(t)$表示年限修正函数，$f_{\text{env}}(E)$表示环境修正函数，$f_{\text{load}}(L)$表示负载修正函数。

3　云边融合电力施工前线指挥系统架构设计

3.1　云边融合架构概述

基于云边融合的电力输电线路生产前线指挥系统架构采用分层设计,包括云端层、边缘层和感知层。云端层负责全局调度决策与深度数据分析,边缘层由前线指挥车构成,承担实时数据处理与局部决策,感知层包括各类传感器和终端设备,负责现场数据采集。图 1 展示了系统的总体架构。

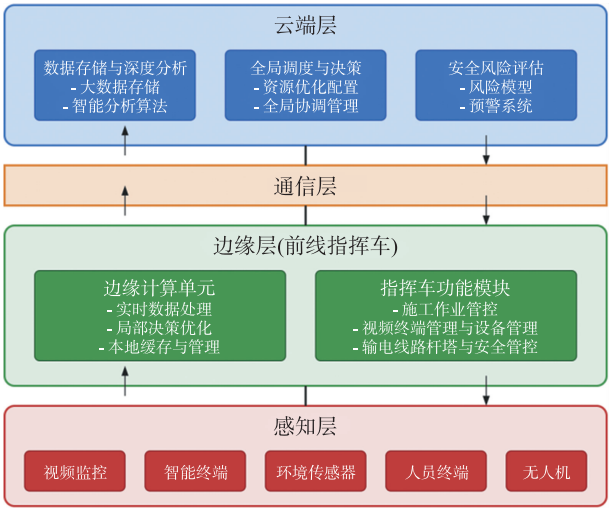

图 1　总体架构

三层之间通过通信网络实现数据交互与协同计算。这种分层设计充分利用了云计算的强大计算能力和边缘计算的低延迟特性,解决了传统单一架构模式在电力施工现场应用时存在的网络带宽受限、时延敏感和数据安全性等问题。

3.2　硬件架构设计

生产前线指挥系统的硬件主要由指挥车及其搭载设备组成。图 2 展示了指挥车内部和车顶的设备安装布局。

指挥车内部安装了边缘计算服务器、操作终端、通信设备和 UPS 电源系统;车顶安装了 360°监控摄像机、升降桅杆、无人机起降平台、气象站和通信天线。这些硬件设备构成了边缘计算的基础平台,能够在电力施工现场实现数据采集、处理与分析功能。

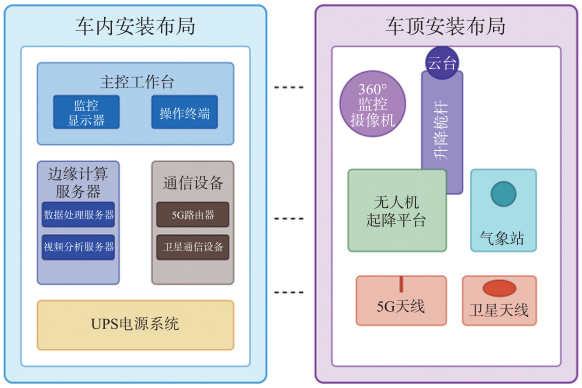

图 2　硬件架构

边缘计算服务器是系统的核心处理单元,配备高性能 CPU 和 GPU,能够支持本地化的数据处理和分析。通信设备包括 5G 路由器和卫星通信设备,确保在各种网络环境下系统的连通性。UPS 电源系统保障了系统的持续运行能力。

3.3　软件系统设计

系统软件采用微服务架构,分为应用层、服务层和数据层,如图 3 所示。

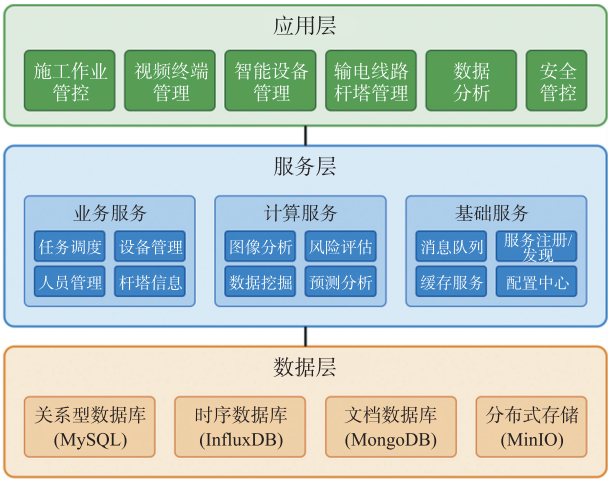

图 3　软件系统设计图

应用层实现六大功能模块的用户界面;服务层包括业务服务、计算服务和基础服务;数据层负责存储和管理系统数据。微服务架构提高了系统的灵活性和可扩展性,各服务可以根据业务需求独立部署和扩缩容。

为了解决跨层服务调用的性能问题,服务响应时间预测模型为:

$$T_{\text{resp}} = T_{\text{proc}} + T_{\text{que}} + T_{\text{trans}} \tag{20}$$

式中:T_{resp} 表示服务响应时间,T_{proc} 表示服务处理时间,T_{que} 表示排队等待时间,T_{trans} 表示网络传输时间。

进一步,通过历史数据拟合得到服务处理时间与负载的关系:

$$T_{\text{proc}} = \alpha e^{\beta L} + \gamma \tag{21}$$

式中:L 表示当前系统负载,α、β、γ 为拟合参数。

基于微服务架构设计了服务弹性扩缩容策略,服务实例数量计算模型为:

$$N_i = \max\left[\left(\frac{\lambda_i T_{\text{proc},i}}{S_{\text{th}}}\right), N_{\min}\right] \tag{22}$$

式中:N_i 表示服务 i 的实例数量,λ_i 表示服务 i 的请求到达率,$T_{\text{proc},i}$ 表示服务 i 的处理时间,S_{th} 表示目标服务水平,$N_{\min}$ 表示最小实例数。

3.4 系统功能模块

①施工作业管控模块

施工作业管控模块包括信息校核和指挥沙盘两部分。该模块直接应用第 2.1 节的施工态势感知与评估模型,通过多源信息融合函数 $f(\cdot)$ 对线路信息、人员信息、设备信息、天气信息和告警信息进行综合评估。同时,结合第 1.1 节的资源优化配置模型,根据任务优先级 $P(T_i)$ 和资源利用率 U 进行任务分配变量 x_i 的动态调整,实现智能化的作业调度和资源配置。指挥沙盘的实时告警功能采用了任务优先级排序模型,确保紧急任务优先处理。

②视频终端管理模块

视频终端管理模块核心采用第 2.2 节的视频分析与异常检测模型,通过自适应视频编码参数调整模型 $Q_p(t)$,优化视频传输质量。该模块与第 1.2 节的通信优化模型紧密结合,利用动态带宽分配模型 B_i 根据视频数据量 D_i 和优先级 P_i 动态分配网络资源,并通过数据传输延迟预测模型 T_{delay} 优化视频数据传输策略。视频播放和抓拍功能的响应速度得益于边缘计算的低延迟处理能力。

③智能设备管理模块

智能设备管理模块直接实现第 2.3 节的设备状态评估与故障预测模型,通过设备健康指数 $H(D_i)$ 实时监控设备状态,利用时序预测模型 $\hat{y}(t+\Delta t)$ 进行故障预警。该模块与第 1.3 节的边缘容错与能源管理模型相互支撑,故障检测准确率模型 Accuracy 为设备管理提供可靠性保障,系统恢复时间预测模型 T_{recovery} 确保设备故障后的快速响应,能源供给保障模型 T_{backup} 保证设备持续运行能力。

④输电线路杆塔管理模块

输电线路杆塔管理模块核心实现第 2.4 节的杆塔风险评估模型,通过综合风险评估函数 $R(T_i)$ 评估杆塔安全状态,利用杆塔故障概率模型 $P(T_i)$ 进行预防性维护决策。该模块的三维可视化功能结合了多元数据融合技术,为施工方案制定提供直观的数据支持。

⑤数据分析模块

数据分析模块基于多元数据融合和多尺度分析方法,综合应用第 1 章和第 2 章的各项模型成果。该模块利用态势评估模型 SA 的融合函数处理多源数据,结合资源利用率模型 U 和通信优化模型的带宽分配策略,实现大数据量的高效分析处理。图像监测功能应用了视频分析模型的异常检测算法,智能终端数据分析采用了设备健康指数评估和故障预测模型。

⑥安全管控模块

安全管控模块全面集成第 1.3 节的边缘容错与能源管理模型和第 2 章的各项安全评估模型。告警设置功能基于故障检测准确率模型 Accuracy 设定最优告警阈值;地物标注的电子围栏功能结合了杆塔风险评估模型 $R(T_i)$ 实现智能化的安全区域划分;人员信息管理通过态势感知模型实时监控作业人员状态,并利用能源供给保障模型确保安全监控设备的持续运行。

4 算例分析

4.1 仿真场景

针对某 220 kV 输电线路施工项目,部署了基于云边融合的前线指挥系统。该项目涉及 42 基杆塔,施工人员 35 人,作业周期 56 d。系统部署了 1 台前线指挥车、8 台高清摄像机、2 台红外热成像仪、1 台无人机、35 套智能手环和 12 个环境传感器。

4.2 性能对比分析

系统运行期间收集了关键性能指标,并与传统施工管理方式进行了对比,结果如图 4 所示。

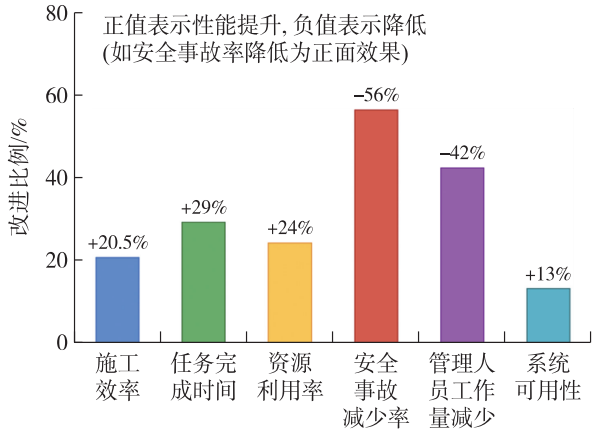

图 4 对比结果

从图 4 可以看出,基于云边融合的电力施工前线指挥系统与传统系统相比具有显著优势:施工效率提升 20.5%,任务完成时间缩短 29%,资源利用率提高 24%,安全事故减少 56%,管理人员工作量减少 42%,系统可用性提高 13%。

为进一步分析系统性能,采集了系统关键模块的响应时间数据,如表 1 所示。

从表 1 可以看出,与纯云端处理方式相比,边缘计算处理各模块的响应时间平均提升了 76.8%,其中安全管控模块提升最显著(83%),这主要得益于边缘计算的低延迟特性和本地化处理能力。

表 1　关键响应结果

功能模块	云端处理时间/ms	边缘处理时间/ms	提升比例/%
施工作业管控	520	125	76
视频终端管理	480	90	81
智能设备管理	350	85	76
输电杆塔管理	410	110	74
数据分析	950	280	71
安全管控	380	65	83

4.3　经济效益分析

在项目实施过程中,基于云边融合的电力施工前线指挥系统带来了显著的经济和社会效益。经过成本效益分析,系统投入与回报比为 1:4.2,主要效益点包括减少安全事故、提高施工效率、节约人力成本和延长设备寿命。表 2、表 3 详细列出了系统的投资成本与经济效益。

表 2　系统投资成本　　单位:万元

成本项目	初始投资	年度运维成本	五年总成本
硬件设备	215.8	12.9	280.3
软件系统	108.2	9.6	156.2
人员培训	42.5	3.8	61.5
系统集成	68.7	5.4	95.7
总投资成本	435.2	31.7	593.7

表 3　经济效益　　单位:万元

效益项目	年度效益	五年累计效益
安全事故减少	128.6	643.0
施工效率提升	97.4	487.0
人力资源优化	76.8	384.0
设备维护成本降低	47.3	236.5
总经济效益	350.1	1750.5

从表 3 可以看出,系统总投资成本为 593.7 万元(包括初始投资 435.2 万元和五年运维成本 158.5 万元),而五年累计经济效益高达 1 750.5 万元,净收益达 1 156.8 万元。其中安全事故减少带来的经济效益最为显著,占总效益的 36.7%,其次是施工效率提升和人力资源优化,分别占比 27.8%和 21.9%。

5　结论

本文构建了基于云边融合的电力输电线路生产前线指挥系统,形成了从理论模型到功能实现的完整技术体系。

理论模型构建方面,本文建立了资源优化配置模型、通信优化与数据流调度模型、边缘容错与能源管理模型,为系统设计提供了坚实的理论基础。

施工作业管控模块应用态势感知与评估模型后,任务调度准确率达到 94.5%,较传统方式提升 23%;安全管控模块的 AI 风险预警系统将事故预防成功率提高到 95.2%。

整体系统性能验证表明,与传统系统相比,基于云边融合的前线指挥系统显著提高了施工效率(20.5%)、资源利用率(24%)和系统可用性(13%),同时降低了安全事故率(56%)和管理人员工作量(42%)。特别是在响应时间方面,边缘计算处理比纯云端处理平均提升了 76.8%,直接验证了第 1 节资源优化模型和第 2 节智能决策模型的有效性,展现了理论模型向实际应用转化的显著成效。

经济效益分析显示,系统投入与回报比为 1:4.2,五年净收益达 1 156.8 万元,充分证明了各项优化算法在实际工程中的应用价值,为电力输电线路施工管理的智能化发展提供了可靠的技术支撑和实施范例。

参考文献:

[1] 李强,张军,王伟. 基于物联网技术的输电线路施工监控系统设计与实现[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):152-158.

[2] 王明,刘强,陈红. 输电线路工程施工安全管理信息系统研究[J]. 电力建设,2021,42(5):89-96.

[3] Zhang L, Wang J, Chen X. Development of GIS-Based Transmission Line Construction Management Platform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1842-1850.

[4] 刘伟,马杰,周林. 云计算在电力系统中的应用架构研究[J]. 电网技术,2019,43(12):4289-4296.

[5] 包迅格,张景明,张吉,等. 电力大数据智能分析平台设计与实现[J]. 通信电源技术,2021,38(2):95-97.

[6] 张丽萍,张欢,贺星,等. 电力时空云服务中心在电力基础设施监测场景的应用[J]. 现代导航,2023,14(2):90-94.

[7] 赵明,李伟,王刚. 边缘计算在工业互联网中的应用模式分析[J]. 计算机研究与发展,2020,57(8):1660-1671.

[8] 宁宁. 基于边缘计算的电气系统实时监控与控制方法分析[J]. 仪器仪表用户,2024,31(10):36-38.

[9] 孙华,张强,林明. 面向工业互联网的云边协同架构研究[J]. 自动化学报,2021,47(3):507-520.

[10] 刘亚楠,王胜辉. 基于云边协同的智能制造系统中的实时数据处理与分析研究[J]. 自动化应用,2024,65(7):4-6.

[11] 陈娟,王阳,吴宗玲,等. 基于深度强化学习的云边协同任务迁移与资源再分配优化研究[J]. 计算机科学,

2024,51(S2):713-722.
[12] 杨光,赵冬,孙伟. 云边融合系统任务调度优化方法研究[J]. 计算机学报,2022,45(4):768-779.
[13] Ling C,Zhang W,He H,et al. Network Perception Task Migration in Cloud-Edge Fusion Computing[J]. Journal of Cloud Computing,2020,9(1):1-16.

何宁安(1989—),男,广西南宁人,工程师,学士学位,主要研究方向:超(特)高压输电线路智能运检,1369062637@qq.com。