

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.05.014

异常事件下工业园区边缘节点集群自组织感知—控制 功能迁移方法

刘艳丽¹, 黄健², 屈乐岩³, 郭瑜³

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网浙江省电力有限公司兰溪市供电公司, 浙江 兰溪 321100;
3. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321000)

摘要: 随着工业环境的快速发展,边缘计算在工业园区智能化中扮演着至关重要的角色。文中研究了边缘节点集群在异常事件下的自组织感知—控制功能迁移方法,旨在提高工业园区的韧性和可靠性。首先,文中对异常场景进行了建模,模拟自然灾害和一般故障异常事件对智慧单元的影响。然后,将传统最大覆盖问题转化为感知体系最大范围覆盖问题,并开发了相应的算法和策略。在此基础上,设计了感知—控制功能迁移算法,并提出了韧性提升的多阶段优化方法。通过算例分析,验证了所提方法能够在异常事件下快速响应并重新组织边缘节点集群的感知和控制功能,有效提升了工业园区感知体系的可观可控范围。文中对于保障工业园区的生产安全、提高生产效率和降低运营成本具有重要的实际意义和理论价值。

关键词: 边缘计算; 自组织网络; 感知—控制功能迁移; 异常事件; 工业园区韧性; 最大覆盖问题; 多阶段优化; 资源分配

Self-organizing Perception-control Function Migration Method of Edge Node Cluster in Industrial Park Under Abnormal Events

LIU Yanli¹, HUANG Jian², QU Leyan³, GUO Yu³

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Lanxi Power Supply Company, Zhejiang Lanxi 321100, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Jinhua Power Supply Company, Zhejiang Jinhua 321000, China)

Abstract: With the rapid development of industrial environment, edge computing plays a crucial role in the intelligence of industrial park. In this paper, the self-organizing perception-control function migration method of edge node clusters under abnormal events is studied with purpose of improving the resilience and reliability of industrial park. Firstly, the abnormal scenarios are modeled in this paper to simulate the impact of both natural disasters and general fault abnormal events on the intelligent units. Then, the traditional maximum coverage problem is transformed into a perception system maximum range coverage problem, and corresponding algorithms and strategies are developed. On this basis, the perception-control function migration algorithm is designed and a multi-stage optimization method for resilience enhancement is proposed. It is verified through case analysis that the proposed method can quickly respond and reorganize the perception and control functions of the edge node cluster under abnormal events so to effectively enhance the observable and controllable range of the perception system of the industrial park. This study has important practical significance and theoretical value for ensuring the production safety, improving production efficiency and reducing operational costs of the industrial park.

Key words: edge computing; self-organizing network; perception-control function migration; abnormal events; industrial park resilience; maximum coverage problem; multi-stage optimization; resource allocation

收稿日期:2024-12-07; 修回日期:2025-02-24

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目资助(5108-202218280A-2-419-XG)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5108-202218280A-2-419-XG).

0 引言

在当今快速发展的工业环境中,边缘计算正逐渐成为工业园区智能化的关键技术之一。边缘计算通过将数据处理和分析任务从中心服务器转移到网络边缘,即靠近数据源的地方,极大地提高了数据处理的速度和效率^[1-4]。这种分布式计算架构不仅减少了数据传输延迟,还降低了对中心网络的带宽需求,从而为工业园区带来了显著的性能提升和成本节约。

在实时数据处理方面,边缘计算能够快速响应工业环境中的动态变化,为生产线提供即时的数据分析和决策支持。这对于需要快速决策以避免生产延误或保证产品质量的应用场景至关重要^[5-6]。此外,边缘计算在感知和控制方面也发挥着关键作用。通过部署智能传感器和执行器,边缘节点能够实时监控工业设备的状态,预测潜在的故障,并自动调整控制参数以优化生产过程。

边缘计算的自组织特性允许工业园区的边缘节点集群在面对异常事件时,如设备故障或网络攻击,能够灵活地重新配置资源和功能,确保关键任务的连续性和系统的稳定性。这种自组织感知—控制功能迁移方法,使得工业园区能够更加智能和弹性地应对各种挑战^[7-8]。

在现代工业园区中,异常事件如设备故障、网络中断和自然灾害等,对正常的生产流程和工业安全构成了严重威胁。这些事件不仅可能导致生产停滞,造成经济损失,还可能引发安全事故,对人员和环境安全带来风险。设备故障可能引起生产线中断,需要紧急维修或更换部件;网络中断会阻碍数据流通,影响生产调度和监控系统的正常运行;自然灾害如地震、洪水等则可能对工业园区的基础设施造成破坏,对生产活动产生长远影响^[9]。异常事件带来的感知和控制挑战主要体现在对事件的快速响应和处理能力上。工业园区需要具备实时监控和智能决策的能力,以快速识别异常事件并采取措施,最小化其对生产和安全的影响。这要求工业园区的感知系统能够准确捕捉到异常信号,而控制系统则需要灵活调整生产流程,重新分配资源,以适应突发事件带来的变化。

为了应对这些挑战,工业园区边缘节点集群的自组织感知—控制功能迁移方法显得尤为重要。这种方法能够在异常事件发生时,通过自组织的方式快速调整边缘节点的感知和控制任务,确保关键能和服务的连续性,提高工业园区的韧性和可靠性。

现有感知控制方法可分为集中式感知控制方法与分布式感知控制方法。集中式感知控制方法资源集中,其所有的决策都由一个强大的中央处理器进行,它可以保证决策的一致性和协调性。由于其控制逻辑较为集中,因此管理和维护起来要相对简单。不过中央处理器一旦出现故障,整个系统便会陷入瘫痪,并且当遇到信息量比较庞大的时候,中央处理器在处理信息时可能会过载。并且集中式的控制不便于系统的变化与扩展。

分布式感知控制方法具有更高的容错性,部分系统出现故障或许不会影响整个系统的运行,并且分布式控制的感知体系架构易于改变,可以随着需求量的变化增加或减少节点数量。同时,由于各节点只与部分节点间构成网络通信关系,因此会大大减少通信负载。然而,由于各节点并没有由统一的网络连接起来,因此在分布式感知控制中,对整体系统的协调控制存在一定的复杂性。另外,分布式感知控制系统各节点的计算与存储能力与集中式感知控制系统存在较大差距,因此,合理分配资源也是分布式感知控制体系的关键。

在异常事件下,集中式系统可能会迅速失效,因为它们依赖于单一的决策中心。恢复可能需要时间,并且可能需要人工干预。分布式系统通常能够更好地适应,因为它们可以局部处理问题。然而,如果异常事件影响了多个节点或关键的通信链路,系统的整体性能可能会受到影响。

目前对于边缘节点自组织网络及其感知控制已有了一定的研究。文[10]面向织机控制终端的信息自主传输及织机互联需求,以去中心化自组织网络为研究目标出了织机自组织网络的构建方法;文[11]设计了基于移动自组织网络的智能感知系统模型,对目前智能系统存在的问题加以补足;文[12]总结了自组织网络在定向天线中的应用。边缘计算以其能够为用户提供低延迟和高可靠性的服务^[13],被广泛应用于各个领域。文[14]为防止网络攻击,提出一种加密边缘计算的无人机自组织网络应用;文[15]引入边缘计算与车辆自组织网络相结合的思想,提高了路侧单元的通信范围;文[16]基于边缘计算方法,构建搭载FaaS服务的分布式无人机自组织通信网络,可实现灵活的部署和调度,以提供高质量的计算服务;文[17]提出了一种车辆自组织网络中面向应急消息的基于边缘计算的非冗余广播算法,使边缘计算车辆根据本地网络的拓扑结构可以有效地在其通信范围内传输应急消息;文[18]为了解决网络节点数量庞大、边缘计算节点选择多样的问

题,展开了基于移动自组织网络的边缘计算研究;文[19]基于边缘计算,利用基于虚拟力的自适应连通机制,通过增大虚拟引力范围解决节点移动过程中断连问题,保证了稀疏自组织网络的连通性;文[20]提出了一种基于边缘计算的分簇路由新算法,在高速移动车辆自组织网络中提高了路由的选择效率;文[21]通过使用边缘服务器、云服务器和区块链基础设施,减少了车载自组织网络的执行时间、安全风险和消息失败率;文[22]提出了一种基于有边缘服务器和无边缘服务器的无人机之间的协作的边缘计算架构,其中计算任务在移动自组网中以多路径和多跳的方式传输;文[23]提出一种基于自组织移动边缘计算系统的开销优化多设备任务调度策略,旨在最大限度地减少每个移动设备的开销;文[24]推断由自组织网络连接的一组服务器在服务运行时同时发生故障或断开连接的概率。

在工业园区的自动化和智能化进程中,边缘计算扮演着至关重要的角色。边缘节点集群作为边缘计算的基础架构,负责实时数据的采集、处理和响应,确保了工业系统的高效运行和精确控制。然而,异常事件的发生往往会对这一系统造成冲击,导致局部或全局的功能失效,影响工业园区的正常运作。因此,研究一种能够在异常事件下快速响应并重新组织边缘节点集群感知—控制功能的迁移方法,具有重大的实际意义和理论价值。

基于最大覆盖的自组织方法,能够在保证网络连接性和服务质量的前提下,实现对边缘节点集群的有效管理和优化。最大覆盖理论在网络优化中的应用已被广泛证明能够提升网络的鲁棒性和效率,通过确保每个节点都能覆盖到最大的服务范围,从而增强整个网络的服务能力^[25]。在边缘节点集群中,这一理论的应用可以显著提高网络的覆盖范围和服务质量,尤其是在工业园区这样地理分布广泛、节点动态变化的环境中。最大覆盖方法的潜力体现在其能够优化资源分配,提高节点间的协同工作能力,实现对异常事件的快速响应和处理。

实现感知和控制功能的动态迁移对于提高工业园区系统的鲁棒性和可靠性至关重要。在异常事件,如设备故障或网络攻击发生时,动态迁移能力可以保证关键功能不会因单一节点的失效而中断,从而维持系统的连续运行和稳定性。此外,感知—控制功能的迁移还有助于优化资源分配,提高系统对环境变化的响应速度和适应能力。通过自组织感知—控制功能迁移,工业园区能够快速响应各种异常事件,实现资源的重新分配和功能的重新

配置。这种能力不仅提高了系统的鲁棒性,也增强了其在面对不确定性和动态变化时的可靠性。这对于保障工业园区的生产安全、提高生产效率和降低运营成本具有重要意义。

文中提出基于最大覆盖的自组织感知—控制功能迁移方法,在异常事件下保证感知和控制功能的连续性;最大化边缘节点的覆盖范围,提高系统的韧性。

首先对异常场景进行建模,模拟其对智慧单元的消极影响,然后将传统最大覆盖问题转化为感知体系最大范围覆盖问题,并开发相应的算法和策略,设计感知—控制功能迁移算法,最后提出韧性提升多阶段优化,在最后评估算法的性能和有效性。

1 异常事件的模型构建

1.1 自然灾害异常事件模型构建

自然灾害以台风天气为例,根据气象部门数据可以计算园区所在地设备感知风速和受影响程度,得到设备故障概率。台风风速示意图1。

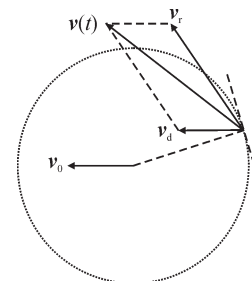


图1 台风风速示意

Fig. 1 Typhoon wind indication

台风风场的瞬时风速 $v(t)$ 等于移动风速 v_d 和循环风速 v_r 的向量和。可使用 Miyazaki 模型计算 v_d , 使用 Rankine(林肯)模型可计算 v_r :

$$v_d = v_0 e^{-\pi r / 10 R_{\max}} \quad (1)$$

$$v_r = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max}} v_{r\max} & 0 \leq r \leq R_{\max} \\ \frac{R_{\max}}{r} v_{r\max} & r > R_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中:

$$r = 6371 \arccos[\sin y_1 \sin y_2 + \cos y_1 \cos y_2 \cos(x_1 - x_2)] \quad (3)$$

$$v_{r\max} = v_{\max} - v_0 e^{-\pi / 10} \quad (4)$$

$$v_0 e^{-\pi r / 10 R_{\max}} + \frac{R_{\max}}{r} v_{r\max} = v_{7\min} \quad (5)$$

式(3)-(5)中: v_0 为台风中心的移动速度;循环风速 v_r 的风向与圆对称风场的逆时针切向方向之间存在一个内偏角,离台风中心越远,该值越大,一般近似取为 20° ; r 为风场中某一点到台风中心的距

离,由坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 得到; v_{\max} 和 v_{\min} 为最大循环风速和中心附近的最大风速; R_{\max} 为最大风速半径; r_7 为7级风半径,其风速下限 $v_{7\min}$ 为13.9 m/s。

线路和节点的瞬时故障率为:

$$\lambda_{\text{wire},i}(t) = \sum_{j \in W_i} \exp\left[a \frac{v_i(t)}{v_{d,\text{wire}}} + b \right] \Delta L_i / 50 \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{tower},i}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) \leq v_{d,\text{tower}} \\ \exp\{c[v(t) - 2v_{d,\text{tower}}]\} & v_{d,\text{tower}} < v(t) \leq 2v_{d,\text{tower}} \\ 1 & v(t) > 2v_{d,\text{tower}} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)中: $\lambda_{\text{wire},i}$ 为 t 时刻单位长度导线 i 的瞬时故障率,以每小时和每50 km导线的故障率为特征; $v_i(t)$ 为线路第 i 段在 t 时刻感受到的有效风速; $v_{d,\text{wire}}$ 和 $v_{d,\text{tower}}$ 分别为导线和塔的设计风速; a 和 b 由导线的历史统计数据得到 $a=11, b=-18$; W_i 为导线 l 的线段集。 $v_{d,\text{tower}}=35$ m/s, $v_{d,\text{wire}}=20$ m/s ; $c=0.2$ 。

时段 $[t_0, t_0+\Delta t]$ 的线路故障率 $p_{\text{wire},i}$ 和塔台故障率 $p_{\text{tower},i}$ 为:

$$p_{\text{wire},i}(t_0, t_0 + \Delta t) = 1 - \exp\left[-\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \lambda_{\text{wire},i}(t) dt\right] \quad (8)$$

$$p_{\text{tower},i}(t_0, t_0 + \Delta t) = 1 - \exp\left[-\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{\lambda_{\text{tower},i}(t)}{1 - \lambda_{\text{tower},i}(t)} dt\right] \quad (9)$$

导线和塔台的故障都会影响架空线路的正常运行。因此,架空线路故障模型线路 l 相当于由导线和杆塔组成的串联系统,可以表示为

$$P_{\text{line},l} = 1 - \prod_{i \in L_{T,l}} (1 - p_{\text{tower},i}) \prod_{i \in L_{W,l}} (1 - p_{\text{wire},i}) \quad (10)$$

1.2 一般故障异常事件模型构建

生产设备故障在异常事件中发生概率最高,构建企业生产设备中长期故障率模型,有助于在感知体系获取数据样本量较少时,从不同侧面量化设备故障率。

多台设备多维特征故障率

$$EFR = BRF \cdot HCC \quad (11)$$

式(11)中: BRF 为基础故障率(base failure rate),是指同电压等级同类设备群体中,故障累计次数与扣除计划停运时间后的总投运年限之比,其数值代表该类设备故障发生频次的统计均值,需根据累计历史数据进行滚动更新; HCC 为隐患因素修正系数(hazard correction coefficient),综合反映设备故障的可观性(detectability)及隐患因素对单台设备差异化的影响。

对多维加权综合基础故障率 BRF 进行建模

$$BRF = \sum_{i=1}^D \omega_i \times BRF_{\text{sd},i} \quad (12)$$

式(12)中: ω_i 为维度 i 对应的故障率权重; $BRF_{\text{sd},i}$ 为第 i 个维度的基础故障率; D 为总维度。

接下来对多维故障率权重进行参数估计,依照极大似然函数估计,可建立似然函数为

$$L(\omega) = \prod_{i=1}^Y \frac{EFR^n \cdot e^{-EFR}}{n_i!} = \frac{EFR^{\sum_{i=1}^Y n_i} e^{-Y \cdot EFR}}{\prod_{i=1}^Y n_i!} \quad (13)$$

式(13)中: Y 为同类设备的故障统计年限; n_i 为第 i 年该类设备发生的故障次数。

对式(13)取对数

$$\ln L = \ln EFR \sum_{i=1}^Y n_i - Y \cdot EFR - \sum_{i=1}^Y \ln n_i! \quad (14)$$

求 $\ln L$ 对 ω 的各项偏导数,再令各项偏导等于零,可建立的方程组为

$$EFR \sum_{i=1}^Y n_i - Y \omega_i \sum_{i=1}^D EFR \omega_i = 0 \quad \forall j \in \{1, \dots, D\} \quad (15)$$

隐患因素相关系数

$$HCC = e^{cA} \quad (16)$$

式(16)中

$$A = \sum_{j=1}^M sev_j / \sum_{j=1}^M sev_{0j} \quad (17)$$

式(16)、(17)中: A 为设备状态评价因子, sev_j 为隐患因素 j 对应的隐患严重程度, sev_{0j} 为隐患因素 j 对应的隐患严重程度基值, M 为该设备隐患因素的数量; $c=2.3$ 为常系数。文中规定, $sev_{0j}, sev_j \in [1, 1]$,且数值越大代表越严重。

HCC 的计算流程见图2。

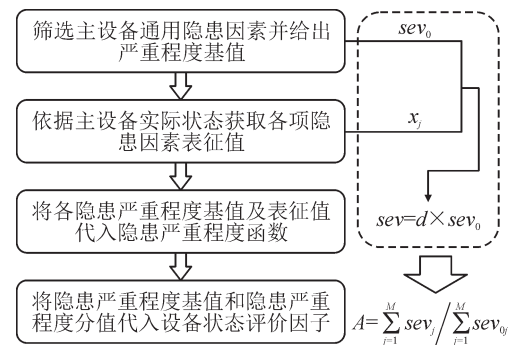


图2 HCC 计算流程

Fig. 2 HCC calculation process

2 边缘节点集群自组织感知—控制功能迁移

2.1 问题转化

将传统最大覆盖问题(maximum covering location problem, MCLP)即解决具有配送半径约束的配送中心选址问题,以实现零售商需求的全部满足,转化为感知体系最大范围覆盖问题即解决具有感

知半径和调控能力约束的智能能源单元感知—控制匹配问题, 以实现负荷感知范围最大化。传统最大覆盖问题见图3, 感知体系最大范围覆盖问题见图4。

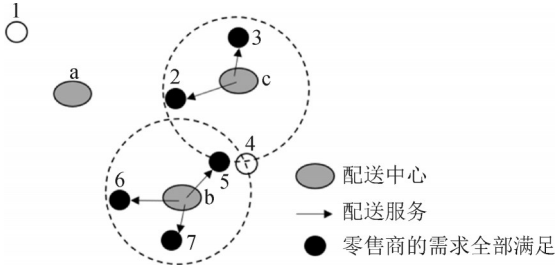


图3 传统最大覆盖问题

Fig. 3 Traditional maximum coverage problem

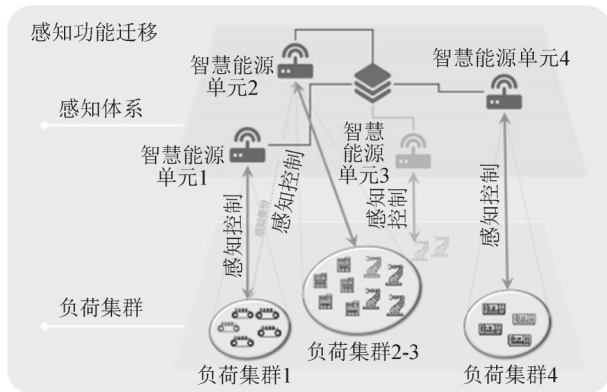


图4 感知体系最大范围覆盖问题

Fig. 4 The problem of maximum coverage of perception system

2.2 模型参数设置

1) 实际感知矩阵

$$S = [s_{ij}] \quad (18)$$

当智慧能源单元 i 对负荷集群 j 实现感知控制功能时, $s_{ij}=1$ 。

2) 负荷集群矩阵

$$L = [l_{ij}] \quad (19)$$

当负荷集群 i 包含设备 j 时, $l_{ij}=1$ 。

3) 感知范围矩阵

$$P = [p_{ij}] \quad (20)$$

当智慧能源单元 i 内部存储负荷集群 j 感知控制模型时, $p_{ij}=1$ 。

4) 代表性节点矩阵

$$R = [r_{ij}] \quad (21)$$

当设备 j 为负荷集群 i 的代表性节点时, $r_{ij}=1$ 。

5) 智慧能源单元的感知能力范围评估指标 IS

$$IS = S \times R \times w_1 + S \times (L - R) \times w_2 + (P - S) \times R \times w_3 + (P - S) \times (L - R) \times w_4 \quad (22)$$

优序图法建立评估指标: 识别评估存活边缘节点, 考虑设备不同权重, 表征网络智慧能源单元对园区设备的覆盖范围, 各权重具体值见表1。

表1 节点权重

Table 1 Node weight

节点	权重				合计	总权重
	实际控制代表性节点	实际控制其余节点	可控集群代表性节点	可控集群其余节点		
实际控制代表性节点	—	1.250	2.000	2.500	5.750	$w_1: 0.404$
实际控制其余节点	0.800	—	1.600	2.000	4.400	$w_2: 0.309$
可控集群代表性节点	0.500	0.625	—	1.250	2.375	$w_3: 0.167$
可控集群其余节点	0.400	0.500	0.800	—	1.700	$w_4: 0.120$

2.3 模型建立

目标函数: 智慧能源单元的感知能力范围最大。

$$\max \sum IS \quad (23)$$

约束条件: 动态更新智慧能源单元感知域约束。

1) 可行感知范围覆盖约束

$$S^r \times L^r \leq P^f \times L^f \quad (24)$$

S^r 为重新分配后的智慧能源单元实际感知矩阵, L^r 为重新划分设备后的负荷集群矩阵, P^f 为故障后智慧能源单元的感知范围矩阵, L^f 为故障后的负荷集群矩阵。

2) 实际感知控制负荷集群个数约束

$$S_{ij}^r \leq P_{ij}^f \quad \forall i \in IU, j \in L_0 \quad (25)$$

重新分配后的智慧能源单元实际感知的负荷集群不超过故障后的可行感知范围。

3) 故障智慧能源单元控制约束

$$\sum_{j \in LC} s_{ij}^f \leq (1 - f_i^{IU}) \sum_{j \in LC} s_{ij} \quad \forall i \in IU \quad (26)$$

式(26)中: LC 为负荷集群集合; IU 为智慧能源单元集合; f_i^{IU} 为智慧能源单元故障情况; s_{ij}^f 为故障后实际感知情况。

4) 故障负荷设备约束

$$l_{ij} \leq 1 - f_j^L \quad \forall j \in L_0 \quad (27)$$

式(27)中: L_0 为设备集合; f_j^L 为设备故障情况。

2.4 工业园区韧性提升多阶段优化

多阶段优化指在多个决策阶段中进行优化的

过程,它涉及到对一系列相互关联的决策步骤进行优化,以实现整个过程中的最佳性能或最大效益。韧性提升的多阶段优化过程见图5。

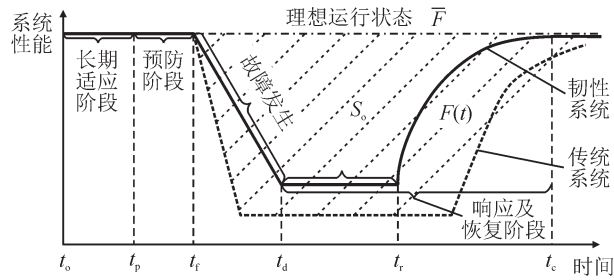


图5 多阶段优化过程

Fig. 5 Multi-stage optimization process

在预防阶段利用提前生成多故障场景优化智慧能源单元布置方案,以实现故障情况下的可观可控范围提升。在响应及恢复阶段基于最大范围覆盖问题模型,实现故障后的感知控制功能迁移以提升感知体系的可观可控范围。

3 算例分析

工业园区共有12个智慧能源单元,20个负荷集群,每个智慧能源单元实际控制1~3个负荷集群,智慧能源单元内部存储最多5个负荷集群的控

制感知信息;每个负荷集群内部含有7~12台设备,其中1台设备为代表性节点。工业园区架构图见图6。

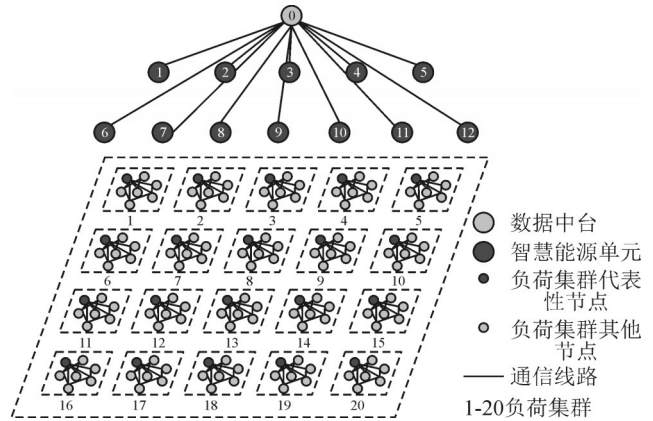


图6 工业园区架构图

Fig. 6 Architecture of industrial park

在预防阶段,针对异常事件实施感知体系韧性提升的边缘节点优化配置,生成多类型故障场景,建立多故障场景下智慧能源单元感知范围计算模型,通过对模型优化计算,得到智慧能源单元优化配置方案。优化配置前后实际感知负荷集群和系统可观可控范围见表2。

表2 预防阶段配置前后实际感知负荷集群和系统可观可控范围

Table 2 The observable and controllable range of the actual perceived load cluster and system before and after configuration in the prevention phase

智慧能源单元	优化配置前实际感知负荷集群	优化配置后实际感知负荷集群	优化配置前系统可观可控范围	优化配置后系统可观可控范围
1	负荷集群 1,2	负荷集群 10,15,20	7.577	10.762
2	负荷集群 3	负荷集群 8,9,12	6.108	10.504
3	负荷集群 4,5	—	7.617	5.395
4	负荷集群 6	负荷集群 16	5.439	6.950
5	负荷集群 7,8	负荷集群 2,13	8.246	8.515
6	负荷集群 9,10	负荷集群 19	7.577	6.526
7	负荷集群 11	负荷集群 18	5.319	8.053
8	负荷集群 12	负荷集群 3,5,7	2.258	11.689
9	负荷集群 13	负荷集群 6,17	7.864	9.013
10	负荷集群 14,15	负荷集群 11,14	9.791	10.849
11	负荷集群 16,17,18	负荷集群 4	9.806	8.002
12	负荷集群 19,20	负荷集群 1	7.148	7.933
系统可观可控范围			84.750	104.196
系统可观可控比例/%			100	100

优化配置后系统可观可控范围上升22.95%,可以得出结论,针对异常事件的感知体系韧性提升的边缘节点优化配置能在多故障场景下的系统可观可控范围进一步提升奠定更好的基础。

在响应阶段,针对异常事件实施边缘节点集群自组织感知—控制功能迁移,动态更新智慧能源单元感知域,重新划分负荷集群,动态调整代表性节

点,更新智慧能源单元实际感知情况。

给定两种指定故障场景。

1)故障1:随机生成20台设备,2个智慧能源单元故障场景。智慧能源单元7、8故障,优化计算重新分配智慧能源单元的感知控制负荷集群,实现故障情况下精准感知系统的感知控制功能迁移。故障1下各配置方案见图7-10。

1	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	
12	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	
	1	2	3	4	20	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图7 故障1原有配置方案

Fig. 7 Original configuration plan of fault 1

1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图8 故障1前期优化配置方案

Fig. 8 Preliminary optimization configuration plan of fault 1

1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
4	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
7	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	
8	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图9 故障1功能迁移方案

Fig. 9 Function migration plan of fault 1

1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
7	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	
8	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	
9	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	
10	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
11	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
12	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图10 故障1前期优化配置+功能迁移方案

Fig. 10 Preliminary optimization configuration + function migration plan of fault 1

感知系统的可观可控范围见表3。

表3 故障1配置前后实际感知负荷集群和系统可观可控范围

Table 3 The observable and controllable range of the actual perceived load cluster and system before and after fault 1 configuration

智慧能源单元	正常运行	故障后	功能迁移	优化配置+功能迁移
1	7.577	6.959	5.588	6.028
2	6.108	5.061	5.439	5.395
3	7.617	7.308	7.308	7.966
4	5.439	5.079	6.072	8.155
5	8.246	8.246	6.308	5.155
6	7.577	6.959	8.330	8.035
7	5.319	0.000	0.000	0.000
8	2.258	0.000	0.000	0.000
9	7.864	7.144	10.453	11.206
10	9.791	8.504	6.566	11.071
11	9.806	8.021	8.399	9.151
12	7.148	6.599	8.159	10.693
系统可观可控范围	84.750	65.179	72.622	82.855
系统可观可控范围降低程度/%	—	23.09	14.31	2.24

根据图7-10及表3可明显看出,采用前期优化配置+故障后功能迁移的方法能够提升感知系统故

障后的可观可控范围。

2)故障2:随机生成20台设备,5个智慧能源单元故障场景。智慧能源单元2、6、8、10、12故障,优化计算重新分配智慧能源单元的感知控制负荷集群,实现故障情况下精准感知系统的感知控制功能迁移。故障2各配置方案见图11-14。

感知系统的可观可控范围见表4。

将正常运行、故障1、故障2这三种场景进行效果对比见表5。

通过表5可以看出,经过前期优化配置,能够大幅提升系统在正常运行以及故障场景下的韧性。采用前期优化配置+故障后功能迁移实现工业园区感知体系的整体韧性提升。

4 结语

文中针对工业园区在异常事件下的挑战,提出了一种自组织感知-控制功能迁移方法。通过对异常场景的建模,模拟了自然灾害和一般故障对智慧单元的影响,并将其转化为感知体系最大范围覆盖问题。在此基础上,开发了相应的算法和策略,设计了感知-控制功能迁移算法,并提出了韧性提升的多阶段优化方法。

1	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	
12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图11 故障2原有配置方案

Fig. 11 Original configuration plan of fault 2

1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图 12 故障2前期优化配置方案

Fig. 12 Preliminary optimization configuration plan of fault 2

1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
3	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000	1.000	0.000	0.000
12	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图 13 故障2功能迁移方案

Fig. 13 Function migration plan of fault 2

1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
2	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
4	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
8	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
9	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
11	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault	fault
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

图 14 故障 2 前期优化配置+功能迁移方案

Fig. 14 Preliminary optimization configuration + function migration plan of fault 2

表 4 故障 2 配置前后实际感知负荷集群和系统可观可控范围

Table 4 The observable and controllable range of the actual perceived load cluster and system before and after fault 2 configuration

智慧能源单元	正常运行	故障后	功能迁移	优化配置+功能迁移
1	7.577	6.959	5.588	7.588
2	6.108	0.000	0.000	0.000
3	7.617	7.308	7.308	9.526
4	5.439	5.079	6.072	10.282
5	8.246	8.246	12.120	8.842
6	7.577	0.000	0.000	0.000
7	5.319	4.152	5.901	8.344
8	2.258	0.000	0.000	0.000
9	7.864	7.144	10.642	11.584
10	9.791	0.000	0.000	0.000
11	9.806	8.021	8.021	9.955
12	7.148	0.000	0.000	0.000
系统可观可控范围	84.750	46.909	55.654	66.121
系统可观可控范围降低程度/%	—	44.65	34.33	21.98

表 5 3 种情况对比

Table 5 Comparison of the three situations

系统可观可控范围	原有配置	前期优化配置	功能迁移	前期优化配置+故障后功能迁移
正常运行	84.750	104.196	—	—
故障 1 后	65.179	81.484	72.622	82.855
故障 2 后	46.909	55.012	55.654	66.121

通过算例分析,验证了所提方法能够在异常事件下快速响应并重新组织边缘节点集群的感知和控制功能,有效提升了工业园区感知体系的可观可控范围。提高了系统韧性,增强了系统可靠性。这对于保障工业园区的生产安全、提高生产效率和降低运营成本具有重要的实际意义和理论价值。

参考文献:

[1] JIN Jiong, YU Kan, ZHANG Ning, et al. Guest editorial: Special section on real-time edge computing over new generation automation networks for industrial cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(12):9268-9270.

[2] 王小雷,宋耐超,史雷敏,等.基于边缘计算的台区状态综合评价方法[J].电测与仪表,2023,60(12):132-138. WANG Xiaolei, SONG Naichao, SHI Leimin, et al. Comprehensive evaluation method of transformer area status based on edge computing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 132-138.

[3] 张明泽,栾文鹏,艾欣,等.基于边缘计算的低压配电网健康状态评价方法[J].电测与仪表,2024,61(5):91-97. ZHANG Mingze, LUAN Wenpeng, AI Xin, et al. A health status assessment method for low-voltage distribution network based on edge computing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5):91-97.

[4] 吕志宁,李颖杰,谭杰.基于边缘计算的电力任务最优调度算法研究[J].电测与仪表,2024,61(8):104-110. LYU Zhining, LI Yingjie, TAN Jie. Research on power task

- optimal scheduling algorithm based on edge computing[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(8): 104-110.
- [5] CAO Kun, HU Shiyan, SHI Yang, et al. A survey on edge and edge-cloud computing assisted cyber-physical systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(11):7806-7819.
- [6] 李宏川, 赵宇, 李彬, 等. 配电物联网边缘计算场景下基于改进ANFIS的电缆通道综合评估及智能预警方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12):94-103.
LI Hongchuan, ZHAO Yu, LI Bin, et al. Comprehensive assessment and intelligent early warning of cable passages based on improved ANFIS in the edge computing scenario of PDIoT[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12):94-103.
- [7] SAEED A, KHATTAK M A K, RASHID S. Role of big data analytics and edge computing in modern IoT applications: A systematic literature review[C]//2022 2nd International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies (ICoDT2). Pakistan: IEEE, 2022: 1-5.
- [8] 张大波, 李雪婷, 陶维青. 基于边缘计算和深度学习的有限信息配电网单相接地故障区段定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(24):22-32.
ZHANG Dabo, LI Xueting, TAO Weiqing. Single-phase ground fault section location in distribution networks with limited information based on edge computing and deep learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(24):22-32.
- [9] ZHOU Yuchen, YU F R, CHEN Jian, et al. Cyber-physical-social systems: A state-of-the-art survey, challenges and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(1):389-425.
- [10] SINGH A, AUJLA G S, SINGH BALI R, et al. A self-organised workload classification and scheduling approach in iot-edge-cloud ecosystem[C]//2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference(VTC2020-Fall). Canada: IEEE, 2020:1-5.
- [11] 王宽. 面向信息自主传输的织机互联自组织网络研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
WANG Kuan. Research on loom interconnection self-organizing network for autonomous information transmission [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [12] 丁智航. 基于自组织网络的智能系统设计与协议研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
DING Zhihang. Model and protocols research of intelligent system based on MANET[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [13] 张庆林, 彭进霖, 韩寒. 定向天线在无线自组织网络路由中的应用综述[J]. *计算机应用*, 2023, 43(s2): 135-141.
ZHANG Qinglin, PENG Jinlin, HAN Han. Review of directional antenna applications in wireless ad hoc network routing[J]. *Journal of Computer Applications*, 2023, 43(s2): 135-141.
- [14] 张文献, 杜永文, 张希权. 面向多用户移动边缘计算轻量任务卸载优化[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(10): 2056-2062.
ZHANG Wenxian, DU Yongwen, ZHANG Xiquan. Optimization of lightweight task offloading for multi-user mobile edge computing[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(10):2056-2062.
- [15] DIN N, WAHEED A, ZAREEI M, et al. An improved identity-based generalized signcryption scheme for secure multi-access edge computing empowered flying Ad Hoc networks[J]. *IEEE Access*, 2021(9):120704-120714.
- [16] 杜恬, 朱金奇, 刘念伯, 等. 停车边缘计算: 车载自组织网络中基于路边停车的任务卸载[J]. *小型微型计算机系统*, 2022, 43(2):416-421.
DU Tian, ZHU Jinqi, LIU Nianbai, et al. Parking edge computing: Task offloading based on roadside parking in vehicle Ad Hoc networks[J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2022, 43(2):416-421.
- [17] 邢福凯. 无人机自组织网络在FaaS服务中的容器缓存与节能调度方案研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
XING Fukai. UAV self-organizing network in FaaS service research on container caching and energy saving scheduling scheme[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [18] 朱银阳. 基于边缘计算的车载通信应急消息传输优化算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
ZHU Yinyang. Research on optimization algorithm of vehicle communication emergency message transmission based on edge computing[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunication, 2020.
- [19] 郭子敬. 基于移动自组织网络的边缘计算研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
WU Zijing. Research on edge computing based on mobile self-organizing network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [20] 李洁, 汪耀, 陈侃松, 等. 基于边缘计算的自适应稀疏传感网目标覆盖算法[J]. *计算机科学*, 2024, 51(6): 364-374.
LI Jie, WANG Yao, CHEN Kansong, et al. Adaptive sparse sensor network target coverage algorithm based on edge computing[J]. *Computer Science*, 2024, 51(6):364-374.
- [21] 张德干, 龚倡乐, 张婷, 等. 基于边缘计算的分簇AODV路由新算法[J]. *北京交通大学学报*, 2022, 46(2):1-10.
ZHANG Degan, GONG Changle, ZHANG Ting, et al. A new algorithm of clustering AODV routing based on edge computing[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2022, 46(2):1-10.

- mathematical model of unmanned surface vessel based on support vector machine[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [33] 徐宇柘, 曹彦萍, 钟锐. 基于LSSVM的多输入多输出开关磁阻电机建模[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(6): 41-46.
XU Yuzhe, CAO Yanping, ZHONG Rui. MIMO modeling of switched reluctance motors based on LSSVM[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(6):41-46.
- [34] 李培强, 李欣然, 陈辉华, 等. 基于减法聚类的模糊神经网络负荷建模[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9):1-6.
LI Peiqiang, LI Xinran, CHEN Huihua, et al. Fuzzy neural network load modeling based on subtractive clustering[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9):1-6.
- [35] 荣海娜, 张葛祥, 金炜东. 系统辨识中支持向量机核函数及其参数的研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3204-3208.
RONG Haina, ZHANG Gexiang, JIN Weidong. Selection of kernel functions and parameters for support vector machines in system identification[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11):3204-3208.
- [36] 尹湘锋, 崔浩锋, 文雪婷. 基于两类核函数的TSVR在股价预测中的比较[J]. 统计与决策, 2021, 37(12):43-46.
YIN Xiangfeng, CUI Haofeng, WEN Xueting. Comparison of TSVR based on two kinds of kernel functions in stock price forecasting[J]. Statistics and Decision, 2021, 37(12): 43-46.
- [37] 涂歆, 严洪森. 基于扩展的径向基函数核支持向量机的产品销售预测模型[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(6):1343-1350.
TU Xin, YAN Hongsen. Product sale forecasting model based on support vector machine with expanded RBF kernel [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(6):1343-1350.
- 邢超(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为直流输电及电力电子技术(通信作者)(E-mail: xingchao_yn@163.com)。

(上接第140页)

- [22] AHMED A, ABDULLAH S, IFTIKHAR S, et al. A novel blockchain based secured and QoS aware IoT vehicular network in edge cloud computing[J]. IEEE Access, 2022 (10):77707-77722.
- [23] FENG Guangsheng, LI Xin, GAO Zihan, et al. Multi-path and multi-hop task offloading in mobile Ad Hoc networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(6):5347-5361.
- [24] LI Tianze, WU Muqing, ZHAO Min, et al. An overhead-optimizing task scheduling strategy for Ad - Hoc based mobile edge computing[J]. IEEE Access, 2017(5): 5609-5622.
- [25] ARAL A, BRANDIĆ I. Learning spatiotemporal failure dependencies for resilient edge computing services[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2021, 32(7):1578-1590.
- 刘艳丽(1985—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、电网信息物理系统(通信作者)(E-mail: yanliliu@tju.edu.cn)。
- 黄健(1976—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电网规划及建设(E-mail: huangry1007@163.com)。
- 屈乐岩(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力营销(E-mail: 1125025316@qq.com)。
- 郭瑜(1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力信息通信技术(E-mail: 77979292@qq.com)。