第 51 卷 第 10 期：5127-5139 高电压技术 Vol.51, No.10: 5127-5139
2025 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250660

基于能量流-信息流耦合的配电信息物理系统孤岛微网分区优化方法

刘预立[1,2]，吴 昊[1,2]，侯 恺[1,2]，靳小龙[1,2]，蔡 胜[3]，贾宏杰[1,2]
（1. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072；2. 智能配用电装备与系统全国重点实验室(天津大学)，天津 300072；3. 南京理工大学自动化学院，南京 210094）

摘 要：在极端自然灾害频发背景下，配电信息物理系统的安全可靠供电面临严峻挑战。为提升其灾后供电保障与快速恢复能力，提出一种基于能量流-信息流耦合的配电信息物理系统孤岛微网分区优化方法。首先，考虑通信网中智能终端设备用于满足孤岛内局域网通信及控制需求，构建考虑通信数据、线路带宽、智能终端算力特性等的通信网信息流模型；其次，建立多类型应急资源调度模型，描述移动通信车与施工队在应急通信搭建及故障修复中的作业路径与时序安排；在此基础上，结合配电网与通信网的耦合特性，提出基于能量流-信息流协同的配电信息物理系统孤岛微网分区优化模型，决策结合构网型电源与智能终端设备的配电网-通信网协同分区方案。最后，利用改进的 IEEE 33 节点算例验证所提方法的有效性与可行性。结果表明，所提策略充分考虑能量流-信息流耦合关系，在显著提升负荷恢复速度的同时，有效减少停电与通信中断带来的损失。

关键词：配电信息物理系统；耦合分区；信息流；协同恢复；智能终端

Optimization Method for Isolated Microgrid Partitioning in Cyber-physical Distribution Systems Based on the Coupling of Energy Flow-Information Flow

LIU Yuli[1,2], WU Hao[1,2], HOU Kai[1,2], JIN Xiaolong[1,2], CAI Sheng[3], JIA Hongjie[1,2]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. State key laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System(Tianjin University), Tianjin 300072, China;
3. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the context of frequent extreme natural disasters, ensuring the safe and reliable power supply of the cyber-physical distribution system faces significant challenges. To enhance its post-disaster power supply security and rapid recovery capabilities, this paper proposes an optimization method for isolated microgrid partitioning in cyber-physical distribution systems based on the coupling of energy flow and information flow. First, the communication network model is developed, considering the use of intelligent terminal devices for local area network communication and control within the island, and incorporating factors such as communication data, line bandwidth, and the computational power of intelligent terminals. Next, a multi-type emergency resource scheduling model is established, describing the operational paths and temporal arrangements of mobile communication vehicles and construction teams during emergency communication setup and fault repair. Based on this, a cyber-physical distribution system islanded microgrid partitioning optimization model is proposed, which combines the coupling characteristics of the distribution network and the communication network, and presents a collaborative partitioning scheme for the distribution network and communication network, taking into account both grid-forming power sources and intelligent terminal devices. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method are verified through an improved IEEE 33-node example. The results show that the proposed strategy fully considers the coupling relationship between energy flow and information flow, significantly improving load recovery speed while effectively reducing the losses caused by power outages and communication interruptions.

Key words: cyber-physical distribution system; coupled partitioning; information flow; coordinated restoration; intelligent terminal

基金资助项目：国家自然科学基金联合基金(U23B600006；U24B200083)；中国博士后科学基金会博士后资助项目(GZC20241197)。
Project supported by Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U23B600006, U24B200083), Postdoctoral Fellowship Program of China Postdoctoral Science Foundation (GZC20241197).

0 引言

随着通信技术、计算机技术和控制技术的深入应用，以及新型电力系统建设的推进，配电信息物理系统(cyber-physical distribution system, CPDS)通过通信网络与配电网络的深度融合，已成为实现智能监控与快速响应的关键载体[1-3]。然而，频发的极端自然灾害给配电信息物理系统带来严峻挑战，导致电力和通信基础设施故障的同时相互影响，进一步扩大停电影响范围[4]。例如，2024 年 7 月湖南省岳阳洪灾导致 1 409 个通信基站中断运行，城区主动拉停 35 条 10 kV 配电线路[5-6]；同年 9 月，海南省台风“摩羯”造成 168.1 万户停电，35 kV 及以上变电站停运 79 座，10 kV 及以上线路跳闸 836 条，累计 29 293 个通信基站退服[7-8]。由此可见，极端自然灾害与配电信息物理系统的耦合特性相互叠加，导致配电信息物理系统安全运行风险进一步增加[9]，极端事件下的弹性水平亟待提升。

近年来，国内外学者在配电网灾后供电恢复领域开展了大量研究[10-12]。传统恢复策略通常采用微网划分方法隔离故障区域并转供非故障区域负荷，以缩小停电范围[13-15]。文献[16]基于滚动优化方法构建配电网孤岛划分及运行模型，有效降低了系统功率损耗；文献[17]提出考虑孤岛融合的多源协同恢复方法，利用分布式电源和储能设备优先支撑重要负荷，并通过分区供电提升系统恢复效率。然而，单一微网划分策略难以实现负荷完全恢复，需结合应急资源调度动态调整分区方案，以实现全网负荷恢复目标[18]。文献[19]提出考虑施工队、网架重构和孤岛微网划分的恢复方法，增强了极端灾害后配电网的弹性；文献[20]提出的两阶段模型优化了施工修复顺序与孤岛微网形成的协同方案，有效提升了微电网供电恢复能力，弥补了固定电源微电网灵活性不足。

然而上述研究大多假设通信网络正常运行，忽略了通信中断对故障检测与控制指令执行的影响。实际运行中，通信故障会严重阻碍配电网状态信息的采集与传输，显著降低系统恢复效率[21]，导致传统恢复方案在通信瘫痪场景下难以实施。因此，部分学者开始关注 CPDS 灾后恢复问题。文献[22-24]分析了通信网络对配电网开关操作的影响，建立了 CPDS 耦合模型并提出优化恢复策略；文献[25]进一步构建协同优化模型，实现配电网络与通信网络施工队的统一调度，提升了系统整体恢复性能；文献[26]通过耦合建模通信与电力网络，提出了两阶段弹性系统灾后顺序恢复策略，优化施工路径与供电恢复时序；文献[27]则协调施工队和移动通信车，在灾害快速建立通信网络，提升了电力恢复能力。

此外，通信网络的信息传输与处理能力对电力系统性能的影响也受到关注。例如，文献[28]研究了带宽受限下的振荡阻尼控制问题，指出通信带宽约束直接影响系统闭环性能；文献[29]赋予终端节点本地信息处理能力，通过数据预处理或边缘计算可以减轻通信负载，提升了系统可靠性和控制监测性能。

尽管已有诸多研究成果，现有策略仍存在以下不足：一方面，多数研究将通信网建模简化为离散连通性约束，缺乏对故障场景下连续信息传递量和信息处理能力的刻画[30]；另一方面，现有研究多假设通信电缆故障与主站失联后通信功能即完全失效，未考虑随着智能终端在配网侧广泛部署[31]，其作为就地数据处理中心也能支撑部分通信需求，在通信网络受限条件下维持局部控制与分区自治。

针对上述问题，本文提出一种基于能量流-信息流耦合的配电信息物理系统孤岛微网分区优化方法，旨在提升系统灾后供电和通信恢复能力。具体而言，首先建立多类型应急资源调度模型，考虑移动通信车和施工队实现应急通信保障和故障线路修复。其次，构建基于能量流-信息流协同的配电信息物理系统孤岛微网分区优化模型，通过构网型电源和智能终端设备分别满足重要负荷供电与微网内通信需求，实现电力微电网与通信局域网耦合分区，并根据线路修复进度和资源调度情况动态调整分区，最大限度减少重要负荷损失。最后，通过改进的 IEEE 33 节点算例，验证所提策略在减少负荷与通信损失、加快灾后恢复速度以及提高系统整体恢复效率方面的有效性。

1 应急资源调度模型

在极端自然灾害后的复杂场景下，CPDS 的快速恢复依赖于多类型应急资源的协同调度。移动通信车为通信网络受损的关键区域提供应急通信支撑；施工队负责配电网或通信网故障线路的修复。尽管任务目标不同，但两类资源的路径规划约束结构相似，且调度指令的执行不受通信故障影响。因此，本章首先给出应急资源统一调度模型，定义相

关变量与通用约束，随后分别阐述移动通信车与施工队的时空调度模型及其特有约束。

1.1　应急资源统一调度模型

灾害发生后，应急资源从其初始位置出发，依次前往指定的任务点执行任务，完成后返回初始点或前往下一目标位置。在此调度框架下，路径连续性、独立性及故障修复分配等约束可统一表述如下：

$$\sum_{i\in\Phi_{\mathrm{F}}} x_{W,i,t}^{g}=1,\forall g,\forall t \tag{1}$$

$$\sum_{i\in\Phi_{\mathrm{F}}} x_{i,W,t}^{g}=1,\forall g,\forall t \tag{2}$$

$$\sum_{j\in\Phi_{\mathrm{F}}} x_{j,i,t}^{g}-\sum_{k\in\Phi_{\mathrm{F}}} x_{i,k,t}^{g}=0,\forall g,\forall i,\forall t \tag{3}$$

$$y_{i,t}^{g}=\sum_{j\in\Phi_{\mathrm{F}}} x_{j,i,t}^{g},\forall g,\forall i,\forall t \tag{4}$$

$$\sum_{g\in\Phi_{\mathrm{R}}} y_{i,t}^{g}\le 1,\forall i,\forall t \tag{5}$$

式中：Φ_{F} 为所有接入点或故障节点的集合；t 为离散时间步，t=1, 2, …, T 表示恢复期内的序列索引；g 表示应急资源单元，可指代某辆移动通信车或某支施工队；i 和 j 为通信网或配电网的节点编号；W 为应急资源初始停放位置；$x_{W,i,t}^{g}$ 为应急资源 g 是否由初始位置 W 前往接入点或故障点 i；$x_{i,W,t}^{g}$ 为应急资源 g 是否由接入点或故障点 i 返回初始位置 W；$x_{j,i,t}^{g}$ 为应急资源 g 的移动状态；Φ_{R} 为所有应急资源的集合；$y_{i,t}^{g}$ 代表接入点或故障点 i 是否由应急资源 g 在时步 t 开始修复或接入。

约束(1)—(2)确保应急资源从初始位置出发，按序访问任务节点后返回，形成完整的闭环调度路径。约束(3)保证应急资源在抵达某节点后持续执行后续任务，维持移动过程的连续性。约束(4)—(5)则防止同一时刻多个应急资源对同一节点进行重复作业。

1.2　移动通信车时空调度模型

移动通信车调度需综合考虑通信覆盖需求、节点供电状态等因素，建立时空耦合约束，如下所示：

$$\sum_{t\in T} t\cdot v_{i,t}^{m}=T_{i}^{m}+n_{i}^{m},\forall i\in\Phi_{\mathrm{J}},\forall m \tag{6}$$

$$q_{i}=\sum_{\tau=1}^{t} p_{i,\tau}-\sum_{\tau=1}^{t} v_{i,\tau}^{m},\forall i\in\Phi_{\mathrm{J}},\forall m \tag{7}$$

式中：Φ_{J} 为移动通信车接入点集合；$v_{i,t}^{m}$ 为移动通信车 m 是否在时步 t 离开接入点 i；T_{i}^{m} 为移动通信车 m 到达接入点 i 的所需的时间；n_{i}^{m} 为节点 i 接入移动通信车 m 的持续时间；τ 为时间累计求和变量，即历史时间步；q_i 为接入点 i 的接入状态；$p_{i,\tau}$ 为是否在时步 τ 时接入节点 i。

约束(6)表示移动通信车在各个接入点的接入时刻和离开时刻，以协调其供电任务。约束(7)表示了移动通信车 m 在接入点 i 的接入状态，例如若 $p_{i,\tau}\in\{0,0,1,0,0,0\}$，$v_{i,t}^{m}\in\{0,0,0,1,0,0\}$，则 t=4 时 $q_i=\sum_{\tau=1}^{4}p_{i,\tau}-\sum_{\tau=1}^{4}v_{i,\tau}^{m}=1-0=1$ 表示此时移动通信车仍然接入节点 i，t=6 时 $\sum_{\tau=1}^{6}p_{i,\tau}-\sum_{\tau=1}^{6}v_{i,\tau}^{m}=1-1=0$ 表示此时移动通信车已离开节点 i。

1.3　施工队时空调度模型

施工队按专业分为配电网和通信网专职施工队，分别前往故障点进行修复。其调度需结合故障线路到达时间、修复时长及修复状态等要素，构建时空耦合约束：

$$\sum_{t\in T} t\cdot o_{i,t}^{w}=T_{i}^{w}+e_{i}^{w}\cdot y_{i,t}^{w},\forall i,\forall w \tag{8}$$

$$a_{i,t}^{w}=a_{i,t-1}^{w}+\sum_{\forall w} o_{i,t}^{w},\forall i,\forall t\ge 1 \tag{9}$$

式中：$o_{i,t}^{w}$ 为施工队 w 在故障点 i 处是否完成修复；$y_{i,t}^{w}$ 为施工队 w 在时步 t 是否开始修复故障点 i；e_{i}^{w} 为施工队 w 在故障点 i 的修复时间；$a_{i,t}^{w}$ 为施工队 w 故障点 i 在时步 t 的修复状态，$k_{i,0}^{w}$=0。

约束(8)将保证作业顺序与时间安排符合逻辑，例如若 T_{i}^{w}=3 且 e_{i}^{w}=2，则 $y_{i,t}^{w}\in\{0,0,1,0,0\}$ 且 $o_{i,t}^{w}\in\{0,0,0,0,1\}$，表示此时施工队在时步 5 完成修复。约束(9)表征了每个故障点的修复状态。

2　配电信息物理系统耦合分区模型

基于第 1 章建立的应急资源调度模型，本章深入研究随着资源调度和恢复进度动态变化的分区策略和恢复路径，并分析在考虑能量流与信息流耦合关系下的协同恢复方法。

图 1 展示了配电信息物理系统耦合分区示意图。系统基于拓扑结构和故障情况，利用构网型电源支撑分区内电力供应，利用智能终端支撑分区内通信需求，实现电力微电网与通信局域网的协同分区自治。

在本文中，构网型电源是指具备自主构网能力的分布式电源，包括具备独立运行能力的储能系统、具备调控能力的微型燃气轮机等电源，其关键特性在于孤岛运行情况下独立维持局部微电网的电压和频率。而单独的光伏、风电等分布式电源属于跟网型电源，无法独立支撑电网运行。

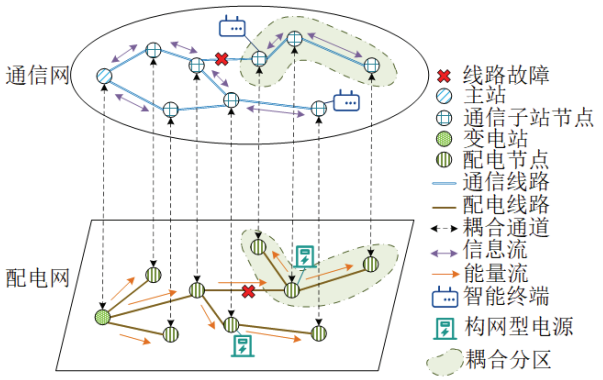


图 1 配电信息物理系统耦合分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the coupling partition of cyber-physical distribution system

2.1 微电网/局域网分区建模

电力微电网与通信局域网分区遵循相似逻辑，利用分区内的构网型电源和智能终端，支撑区域内电力供应和通信需求，并依据应急资源调度进展与系统恢复状态调整分区策略，减少恢复过程中重要负荷损失。配电网与通信网的通用分区模型如下所示：

$$c_{i,j,t}^{k} \le z_{i,t}^{k}, \forall i, \forall t \tag{10}$$

$$\sum_{\forall k} c_{i,j,t}^{k} \le 1, \forall (i,j), \forall t \tag{11}$$

$$c_{i,j,t}^{k} \le z_{i,t}^{k}, \forall i, \forall t \tag{12}$$

$$c_{i,j,t}^{k} \le z_{j,t}^{k}, \forall j, \forall t \tag{13}$$

$$c_{i,j,t}^{k} \ge z_{i,t}^{k} + z_{j,t}^{k} - 1, \forall (i,j), \forall t \tag{14}$$

$$\beta_{i,j,t} = \sum_{\forall k} c_{i,j,t}^{k}, \forall (i,j), \forall t \tag{15}$$

$$\beta_{i,j,t} \le s_{i,j,t}, \forall (i,j), \forall t \tag{16}$$

$$u_{i,t}^{k} \le z_{i,t}^{k}, \forall i, \forall t \tag{17}$$

式中：$z_{i,t}^{k}$ 和 $c_{i,j,t}^{k}$ 为节点和线路的二进制分区变量，k 为分区编号，当节点 i 和线路 i-j 在时步 t 属于分区 k，则分区变量均等于 1；$\beta_{i,j,t}$ 为线路 i-j 的开关状态；$s_{i,j,t}$ 为线路修复状态；$u_{i,t}^{k}$ 为节点恢复状态。

约束(10)—(11)限定每个节点和每条线路最多归属一个分区。约束(12)—(14)确保线路仅在两端节点同属一个分区时才纳入该分区。约束(15)表示根据分区变量决定线路开关的状态，即当线路 i-j 位于两个分区的边界时，线路需要断开。约束(16)表示故障线路在修复前无法闭合。约束(17)则表示分区变量受节点恢复状态限制。

2.2 微电网/局域网恢复路径建模

灾后配电网与通信网的恢复路径生成对于提升系统恢复效率至关重要。尽管二者均以故障线路修复与网络联通为目标，但其约束特性存在差异：1）配电网恢复路径需从上级电源或构网型电源出发，联通分区内非故障负荷节点。而通信网则通过主站、移动通信车和部署在关键位置的智能终端，支持分区内恢复路径的生成与信息流通。2）配电网以树状或辐射状结构逐步恢复各负荷节点，为了确保安全性与潮流计算的可控性，往往限制环网结构的出现。通信网路径恢复则允许形成环状结构，鼓励利用拓扑冗余来提高网络的可靠性和信息传输带宽。

本节对配电网和通信网的恢复路径进行统一建模，并依据二者的特性设置差异化约束。以配电网恢复路径为例，其相关约束如下所示：

$$r_{i,i,t} \le 1, \forall i \in \Omega_{\mathrm{GF}}, \forall t \tag{18}$$

$$r_{i,i,t} = 0, \forall i \notin \Omega_{\mathrm{GF}}, \forall t \tag{19}$$

$$\sum_{\forall j} r_{i,j,t} \le M \cdot \sum_{\forall j} r_{j,i,t}, \forall i, \forall t \tag{20}$$

$$r_{i,j,t} + r_{j,i,t} \le \beta_{i,j,t}^{\mathrm{D}}, \forall (i,j), \forall t \tag{21}$$

$$\sum_{\forall j} r_{j,i,t} \ge u_{i,t}^{k}, \forall i \notin \Omega_{\mathrm{GF}}, \forall k, \forall t \tag{22}$$

$$\sum_{\forall j} r_{j,i,t} \ge z_{i,t}^{k}, \forall i \notin \Omega_{\mathrm{GF}}, \forall k, \forall t \tag{23}$$

$$\sum_{i \in V} r_{i,j,t} \le 1, \forall j, \forall k, \forall t \tag{24}$$

式中：$r_{i,j,t}$ 为网络的恢复路径，若线路 i-j 于时步 t 有恢复路径，则为 1，否则为 0；Ω_{GF} 为构网型电源集合；M 为放大因子，表示一个大数；$\beta_{i,j,t}^{\mathrm{D}}$ 为配电线路 i-j 的开关状态。

约束(18)和(19)确保恢复路径从构网型电源出发。约束(20)保障节点只有在有恢复路径流入的情况下才能有恢复路径流出。约束(21)确保每条闭合线路上最多有一条恢复路径。约束(22)表示当节点有恢复路径时则可以被恢复。约束(23)表示对于分区内每个非构网型电源接入节点 i 都有足够的恢复路径支持。约束(24)确保配电网的径向恢复路径，避免形成环网，通信网恢复路径建模不受这条约束限制。

2.3 通信网信息流建模

信息流传递是通信网恢复过程中的关键环节，图 2 展示了信息流传输模型的多因素影响结构。该图描绘了信息从“数据源”，经过“通信信道”，最终到达“智能终端接收处理”的双向传输过程。可以看出，建立信息流模型时，需要综合考虑信道衰减、带宽容量和终端算力等多种因素，以准确刻画灾后通信网络中信息流传输的特性和限制。

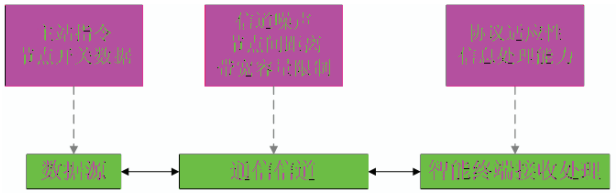


图 2　信息流传输模型的多因素影响结构图

Fig.2　Multi-factor influence structure of information flow transmission models

通信网信息流模型如下所示：

$$\begin{cases} h_{i,j,t}=1,\ f_{i,j,t}>0 \\ h_{i,j,t}=0,\ f_{i,j,t}=0 \end{cases} \quad \forall(i,j),\forall t \tag{25}$$

$$l_{j,t}\le\sum_{\forall i}h_{i,j,t},\forall j,\forall t \tag{26}$$

$$h_{i,j,t}\le r_{i,j,t},\ \forall(i,j),\forall t \tag{27}$$

$$\sum_{\forall k}f_{i,k,t}=\sum_{\forall j}f_{j,i,t},\ \forall i,\forall t \tag{28}$$

$$f_{i,j,t}^{\text{post}}=f_{i,j,t}^{\text{pre}}+\Delta f_{i,j,t},\forall(i,j),\forall t \tag{29}$$

$$f_{i,j,t}^{\text{post}}\le s_{i,j,t},\forall(i,j),\forall t \tag{30}$$

$$C_{i,j,t}=B_{i,j,t}\log_2\left(1+\frac{S}{N}\right) \tag{31}$$

$$G_{i,j,t}=G_0\cdot\left(\frac{d_0}{d_{i,j}}\right)^{\xi}\cdot10^{\chi_{i,j}/10} \tag{32}$$

$$C'_{i,j,t}=B'_{i,j,t}\log_2\left(1+\frac{P_{\text{F}}G_{i,j,t}}{N_0B'_{i,j,t}}\right) \tag{33}$$

$$f_{i,j,t}+f_{j,i,t}\le C_{i,j,t}\cdot\beta_{i,j,t}^{\text{C}},\ \forall(i,j),\forall t \tag{34}$$

$$f_{i,j,t}+f_{j,i,t}\le C'_{i,j,t}\cdot\beta_{i,j,t}^{\text{C}},\ \forall(i,j),\forall t \tag{35}$$

$$R_{i,j,t}\le\min\left(C_{i,j,t},C'_{i,j,t}\right),\forall(i,j),\forall t \tag{36}$$

$$\sum_{(i,j)\in X}\frac{D_{i,j,t}}{R_{i,j,t}}\le T_{\text{cycle}},\forall t \tag{37}$$

$$\sum\left(\frac{f_{i,j,t}}{C_{i,j,t}}+\frac{L_{\text{packet}}}{R_{i,j,t}}+\frac{d_{i,j}}{v_{\text{pr}}}\right)\le T_{\text{D}}^{\max} \tag{38}$$

式中：$h_{i,j,t}$为节点 i 向节点 j 传递数据；$f_{i,j,t}$为从节点 i 到节点 j 的信息流；$l_{j,t}$为节点 j 是否接收到信息流传递；$f_{i,j,t}^{\text{pre}}$为故障前链路的信息流；$f_{i,j,t}^{\text{post}}$为故障后的信息流；$\Delta f_{i,j,t}$为由于故障引起的信息流变化；$\beta_{i,j,t}^{\text{C}}$为通信线路开关状态；$B_{i,j,t}$为链路带宽理论上限，取值由通信介质决定；$C_{i,j,t}$为简化香农定理计算的信道容量理论上限；S 表示接收端所收到的信号功率，数值由发射功率和链路增益决定；N 为噪声功率，取决于噪声谱密度和带宽，小于信号功率；S/N 为信号噪声比；$G_{i,j,t}$为链路增益，数值上小于 1，且随节点距离增加而衰减；G_0为参考增益，取 1；d_0为参考距离，取 1 m；$d_{i,j}$为节点 i 和节点 j 的距离，数值由实际地理位置决定；ξ 为路径损耗指数，数值取 3；$\chi_{i,j}$为对数正态阴影衰落变量，用于表示环境引起的阴影衰减；$B'_{i,j,t}$为链路实际带宽；$C'_{i,j,t}$为通过距离衰减和阴影衰落模型计算出的链路容量；P_{F}为节点发送信号的功率；N_0为噪声谱密度常数，乘以带宽得到总噪声功率；$G_{i,j,t}$为链路增益；$R_{i,j,t}$为链路实际可用速率；$D_{i,j,t}$为链路数据量；X 为高优先级链路集合；T_{cycle}为通信网调度周期；L_{packet}为数据包长度；v_{pr}为信号传播速度；$T_{\text{D}}^{\max}$为最大允许时延。

约束(25)和(26)定义节点接收数据的条件。约束(27)表示只有当通信路径存在时，链路信息流才能传递。约束(28)表示通信网中的信息流必须保持平衡，确保在每个节点处的信息流量准确无误且没有数据堆积或丢失，除非该节点是源节点。约束(29)量化故障对信息流的影响。约束(30)表示若链路尚未修复，该处信息流无法通过。约束(31)采用简化香农定理来估计链路的最大通信容量，在带宽 $B_{i,j,t}$下信道容量与信号噪声比呈对数关系。若利用无线通信信道，则信号功率取决于发射功率和链路增益。约束(32)表示通过距离衰减和阴影衰落模型计算出的链路增益。约束(33)为通过距离衰减和阴影衰落模型计算出的更通用香农信道定理。约束(34)和(35)保证了同一链路上两个方向流量之和不超过该链路的容量，同时考虑到恢复过程中若链路断开，则流量被限制为零。约束(36)表示实际可用速率需小于信道容量。约束(37)确保高优先级流量在调度周期内完成传输，避免因链路拥塞导致控制指令延迟。约束(38)确保传输时延、处理时延、传播时延之和不超过最大允许时延。

本文所采用的信道模型为叠加大尺度路径损耗和阴影衰落的加性白高斯噪声信道模型，考虑现实中距离和阴影对信息传递的影响进行建模。然而在实际灾后通信环境中，信道的非理想特性如多径干扰、噪声水平变化、设备性能等因素可能进一步限制链路实际可用容量。

2.4　配电网能量流模型

配电网能量流模型旨在模拟和优化配电网中电能的传输与分配，确保系统在各类运行条件下的

稳定和高效。模型综合考虑构网型电源出力、线路潮流、节点电压等约束，具体如下所示：

$$0 \le P_{i,t}^{\mathrm{D}} \le u_{i,t}^{\mathrm{DY}} P_{i,t}^{\mathrm{L}}, \forall t, \forall i \tag{39}$$

$$0 \le P_{i,t}^{\mathrm{G}} \le u_{i,t}^{\mathrm{DN}} P_{i}^{\mathrm{G,max}}, \forall t, \forall i \tag{40}$$

$$0 \le Q_{i,t}^{\mathrm{G}} \le u_{i,t}^{\mathrm{DN}} Q_{i}^{\mathrm{G,max}}, \forall t, \forall i \tag{41}$$

$$-MP_{i,j,t} \le P_{i,j,t} \le MP_{i,j,t}, \forall (i,j), \forall t \tag{42}$$

$$-MP_{i,j,t} \le Q_{i,j,t} \le MP_{i,j,t}, \forall (i,j), \forall t \tag{43}$$

$$\sum_{\forall j} P_{j,i,t} + P_{i,t}^{\mathrm{G}} = P_{i,t}^{\mathrm{D}} + \sum_{\forall j} P_{i,j,t}, \forall i, \forall t \tag{44}$$

$$\sum_{\forall j} Q_{j,i,t} + Q_{i,t}^{\mathrm{G}} = P_{i,t}^{\mathrm{D}} + \sum_{\forall j} Q_{i,j,t}, \forall i, \forall t \tag{45}$$

$$U_{i,t} - U_{j,t} \le 2\left(R_{i,j} \cdot P_{i,j,t} + X_{i,j} \cdot Q_{i,j,t}\right) + M\left(1 - s_{i,j,t}\right), \forall i, j, \forall t \tag{46}$$

$$U_{i,t} - U_{j,t} \ge 2\left(R_{i,j} \cdot P_{i,j,t} + X_{i,j} \cdot Q_{i,j,t}\right) - M\left(1 - s_{i,j,t}\right), \forall i, j, \forall t \tag{47}$$

$$u_{i,t}\underline{U}_i \le U_{i,t} \le u_{i,t}\overline{U}_i, \forall i, \forall t \tag{48}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{D}}$ 为节点负荷恢复量；$P_{i,t}^{\mathrm{L}}$ 为节点负荷需求量；$u_{i,t}^{\mathrm{DY}}$ 为节点 i 在时步 t 的负荷状态；$u_{i,t}^{\mathrm{DN}}$ 为连接构网型电源的节点 i 在时步 t 的运行状态；$P_{i,t}^{\mathrm{G}}$ 和 $Q_{i,t}^{\mathrm{G}}$ 为配电网中构网型电源的有功和无功输出；$P_{i}^{\mathrm{G,max}}$ 和 $Q_{i}^{\mathrm{G,max}}$ 为机组的有功无功最大出力值；$P_{i,j,t}$ 和 $Q_{i,j,t}$ 表示线路 i-j 在时步 t 的有功无功能量流；$R_{i,j}$ 和 $X_{i,j}$ 为线路的电阻和电抗；$U_{i,t}$ 为节点 i 在时步 t 的电压大小；$\overline{U}_i$ 和 $\underline{U}_i$ 为节点 i 的电压上下限。

约束(39)表示负荷恢复范围，并且当前节点恢复后负荷才能恢复。约束(40)和(41)表示当配电网中节点恢复后，构网型电源可以发生出力，并给出了电源的有功无功输出范围。约束(42)和(43)表示当配电网中线路恢复后，线路可以传输有功无功，并给出了线路功率的表示。有功和无功功率平衡由约束(44)和(45)表示，节点电压在约束(46)和(47)中得到，电压偏差允许范围如约束(48)所示。

2.5 耦合模型

在灾后配电信息物理系统的孤岛恢复场景中，配电网与通信网呈现高度耦合特性。一方面，通信网的持续运行高度依赖配电网的供电支持；另一方面，配电网区域自治和孤岛调度的实现又必须依赖通信网提供的局部感知与控制功能。为此，基于前述模型，构建配电网与通信网的耦合约束。

2.5.1 通信网对于配电网的需求

通信节点的恢复依赖配电网供电支持，具体约束如下所示：

$$\sum_{\forall i} u_{\mathrm{C},i,t}^{k} \le \sum_{i \in B} u_{\mathrm{D},i,t}^{k}, \forall k, \forall t \tag{49}$$

$$\sum_{\forall i} f_{i,j,t} \cdot \sigma \le P_{j,t}^{\mathrm{c}}, \forall j, \forall t \tag{50}$$

$$\sum_{\forall j} P_{j,t}^{\mathrm{c}} \le \sum_{\forall i} P_{i,t}, \forall t \tag{51}$$

式中：$u_{\mathrm{C},i,t}^{k}$ 为通信节点恢复状态；$u_{\mathrm{D},i,t}^{k}$ 为配网节点恢复状态；B 为通信节点 j 所依赖的电力节点集合；σ 为单位信息流所需功率支撑；$P_{j,t}^{\mathrm{c}}$ 为分配给通信节点的功率；$P_{i,t}$ 为节点 i 的供电功率。

约束(49)表示只有当其依赖的电力节点恢复后，通信节点才可能恢复。约束(50)确保每个通信节点 j 的电力功率分配不小于其实际的功率需求。约束(51)确保通信网络所需的功率不会超过配电网的供电功率。

2.5.2 电网对于通信网的需求

配电网中的设备控制及状态检测需要通信网络来传递故障信息和调度指令。此外，智能终端被部署在关键节点，用于处理分区内的信息流。智能终端的算力限制与电力供给之间存在耦合关系。具体约束如下所示：

$$\sum_{\forall i} u_{\mathrm{D},i,t}^{k} \le \sum_{i \in A} u_{\mathrm{C},i,t}^{k}, \forall k, \forall t \tag{52}$$

$$\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{c}}} f_{j,s,t} \cdot \alpha \le C_s, \forall s, \forall t \tag{53}$$

$$P_{i,t} \ge P_{\mathrm{base},i} + \gamma_k \cdot \left(\frac{\sum_{j=1}^{N_{\mathrm{c}}} f_{j,s,t} \cdot \alpha}{C_s} \right), \forall i, \forall s, \forall t \tag{54}$$

式中：A 为配电节点 i 所依赖的通信节点集合；$f_{j,s,t}$ 为从节点 j 到智能终端 s 的信息流；α 为单位信息流所需算力；C_s 为智能终端 s 的算力容量上限；$P_{\mathrm{base},i}$ 为节点 i 的基础供电需求；γ_k 为算力负载与供电之间的比例系数。

约束(52)确保每个配电节点 i 的恢复状态受其依赖的通信节点恢复状态限制，若通信网络尚未恢复，则配电侧的实时调度与监控难以实现，进而无法完成对负荷、构网型电源等要素的有效管理。约束(53)用以限制流经每个智能终端的总信息流不会超出该智能终端的信息处理能力。约束(54)表示智能终端的动态算力与电力供应的关系，在灾后恢复过程中，智能终端的算力负载会影响电力需求，特别是高负载情况下。

2.6　目标函数

在极端灾害导致配电信息物理系统故障，进而引发大面积停电与通信中断的严峻场景下，本文提出的灾后耦合分区及协同恢复方法旨在最小化配电网的负荷损失并保障修复故障通信链路。目标函数表示为：

$$\min \sum_{\forall i}\sum_{t\in T}\rho_l\left(P_{i,t}^{\mathrm{L}}-P_{i,t}^{\mathrm{D}}\right)-\rho_c\sum_{(i,j)\in L_c}\sum_{t\in T}s_{i,j,t}^{\mathrm{C}} \tag{55}$$

式中：ρ_l为配电网中负荷损失权重系数；ρ_c为通信链路恢复权重系数；L_c为通信链路集合；$s_{i,j,t}^{\mathrm{C}}$为通信链路修复状态。

该目标函数是在满足第 1 章和第 2 章所提应急资源调度约束和配电信息物理系统耦合分区约束的前提下，最小化配电网的负荷损失并保障修复故障通信链路，求解得到移动通信车与施工队的最优调度方案、耦合分区方案及各线路、节点的修复情况，从而有效提升系统的整体恢复效率。

3　算例分析

为验证本文提出的配电信息物理系统灾后耦合分区与协同恢复策略的有效性和可行性，本文在 MATLAB R2023b 环境下编写算例程序，并通过 Yalmip 调用商业求解器 CPLEX 进行求解。

3.1　算例场景

本研究基于改进的 IEEE 33 节点配电信息物理系统构建测试场景，系统拓扑结构如图 3 所示。其中，配电网基准电压为 12.66 kV，总负荷需求为 3.71 MW+1.50 Mvar，允许电压偏差为±5%，共有 33 个节点。配电网在节点 6、13、16 分别配备 3 个构网型电源，容量分别为 600、800、700 kW。由于配电线路与通信电缆并行安装，假设通信网同样包含 33 个节点，以节点 1 作为通信主站，并在通信节点 4、6、16 部署算力容量为 10TFLOPS 的智能终端，信息流单位采用 b/s。设定有线通信链路带宽为 100 Mb/s，移动通信车辆提供的临时无线链路带宽为 500 Mb/s。假定通信链路时延极低，本文忽略时延影响。

假设极端自然灾害导致配电线路 D4-5、D8-9、D15-16、D20-21 和 D29-30 发生故障，通信线路 C4-5、C8-9、C15-16、C2-19 和 C6-26 出现中断。为快速恢复故障区域，预设两支施工队：一支专职修复配电网，另一支专职修复通信网。此外，为提升初期通信覆盖与恢复效率，部署一组移动通信车协同施工队进行抢修。设定总恢复时步数为 13，且单位时步为 20 min。算例测试环境为：Intel Core i5 CPU(主频 3.50 GHz)，内存 16 GB。经过求解器计算，本模型在此环境和仿真参数设置下的求解时间约为 720 s。

3.2　灾后恢复策略结果

极端灾害引发配电信息物理系统大面积停电与通信中断，本文提出的灾后协同恢复方法通过动态耦合分区与资源调度，实现故障区域的有序恢复。策略执行过程严格遵循分区内功率平衡和信息流可行性约束，即电力侧需保证变电站或构网型电源的有功、无功输出与负荷需求匹配，通信侧需满足智能终端算力及链路带宽限制。

图 4 展示了配电信息物理系统中应急资源的调度方案。不同颜色用以区分各时步中施工队或移动通信车的故障修复或接入状态，符号“→”表示移动通信车和施工队在移动或完成修复后返回仓库的过程。

图 5—7 显示了各时步下耦合分区动态变化过程。

在如图 5(a)所示的时步 1 中，配电线路 D4-5、D20-21 故障，通信节点 19、20 与主站断联，故耦合分区 I 仅包含节点 1-4 与 23-25。节点 6 处的智能终端可为配电节点 5-8 提供信息交互，形成耦合分区 II。节点 16 处的智能终端算力有限，仅支撑节点 16-18 的信息流，构成耦合分区 III。节点 30-33 由构网型电源提供功率，但尚未恢复通信，暂未纳入

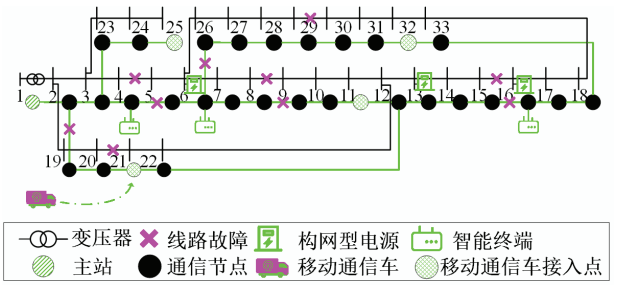


图 3　改进的 IEEE 33 配电信息物理系统

Fig.3　Improved IEEE 33 cyber-physical distribution system

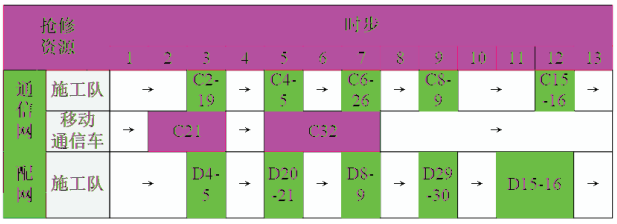


图 4　应急资源调度方案

Fig.4　Emergency resource dispatching scheme

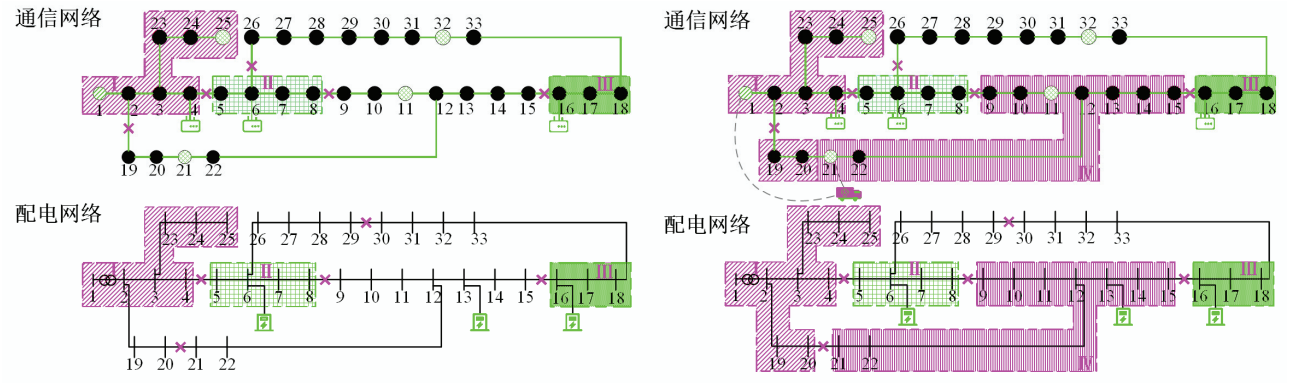
该分区。时步 1 下，两支施工队分别前往故障配电线路 D4-5 和通信线路 C2-19，移动通信车也由仓库出发前往接入点 21。

在如图 5(b)所示的时步 2 中，移动通信车接入节点 21 后，使得通信节点 9-15 和 19-22 恢复与主站通信连接，此前无法连通主站的节点 19、20 划入耦合分区 Ⅰ。耦合分区Ⅱ和Ⅲ仍维持不变。由于移动通信车的接入，通信节点 9-15 和 19-22 功能恢复，其中 9-15 和 21-22 节点由同一个构网型电源提供功率支持，因此这些节点划分至耦合分区Ⅳ。

在如图 6(a)所示的时步 3 中，两支施工队分别到达故障配电线路 D4-5 和通信线路 C2-19 并完成修复，移动通信车留在接入点 21。虽然配网线路恢复后节点 5-8 同时连接上级电源与构网型电源，但节点 5-8 的通信仍由节点 6 处的智能终端提供，因此四个耦合分区的范围均保持不变。

在如图 6(b)所示的时步 5 中，两支施工队分别到达故障配电线路 20-21 和通信线路 4-5 并完成修复，移动通信车则由接入点 21 移动至接入点 32，恢复通信节点 16-18、26-33 与主站的通信连接。此时，耦合分区Ⅰ包含节点 1-15、19-22 和 23-29，由上级电源和构网型电源供电。其中，通信节点 26-29 由移动通信车提供与主站的远程连接，对应配网节点也由上级电源供电，因此也纳入耦合分区Ⅰ。移动通信车的接入后，智能终端在节点 16 的算力得到补充，原本受算力限制的节点 30-33 也可并入耦合分区Ⅲ。

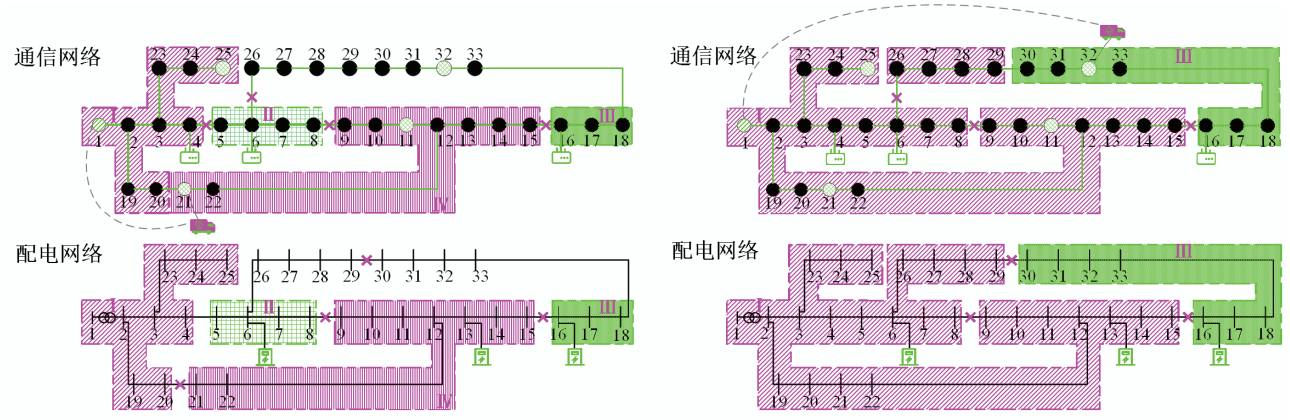
在如图 7(a)所示的时步 7 中，两支施工队分别到达故障配电线路 8-9 和通信线路 6-26 并完成修复，移动通信车仍位于接入点 32。此时，耦合分区Ⅰ与Ⅲ内的故障均已修复或处于可控状态，分区划分保持不变。由于移动通信车接入点 32 临近故障通信线路 6-26 已恢复，该区域通信恢复，所以移动通信车将于下一时步离开接入点 32 并返回仓库。



(a) 时步 1 耦合分区情况　　(b) 时步 2 耦合分区情况

图 5　时步 1 和时步 2 耦合分区动态变化图

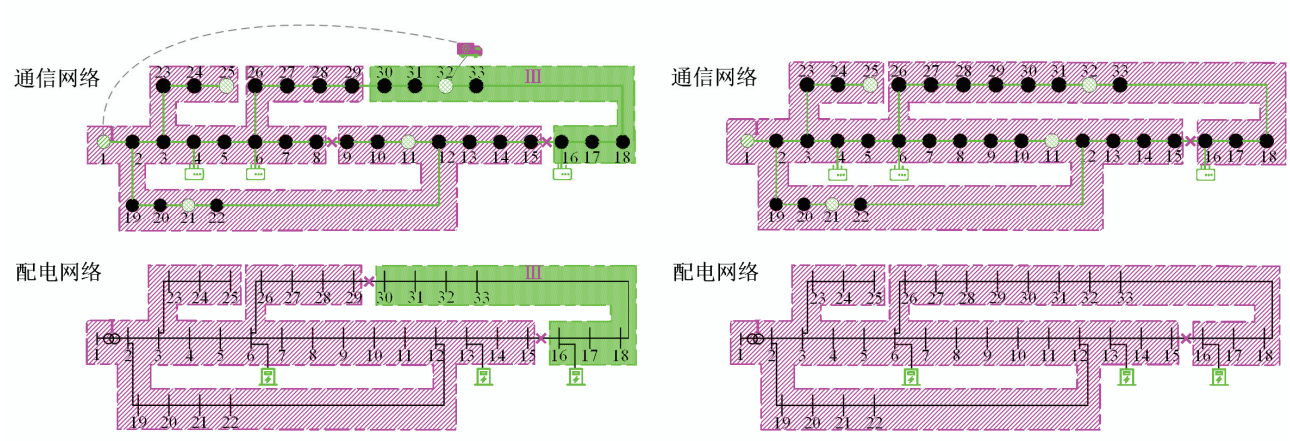
Fig.5　Dynamics of time-step 1 and time-step 2 coupling partitions



(a) 时步 3 耦合分区情况　　(b) 时步 5 耦合分区情况

图 6　时步 3 和时步 5 耦合分区动态变化图

Fig.6　Dynamics of time-step 3 and time-step 5 coupling partitions



(a) 时步 7 耦合分区情况　　(b) 时步 9 耦合分区情况

图 7　时步 7 和时步 9 耦合分区动态变化图

Fig.7　Dynamics of time-step 7 and time-step 9 coupling partitions

在如图 7(b)所示的时步 9 中，两支施工队分别到达故障配电线路 29-30 和通信线路 8-9 并完成修复。此时，所有配电节点均可由上级电源提供功率支持，并且所有通信节点均恢复与主站的通信连接，因此所有节点并入耦合分区Ⅰ。最终在时步 12，两支施工队分别完成故障配电线路 15-16 和通信线路 15-16 的修复任务，至此所有故障线路完成抢修，系统全部功能全面恢复。

基于配电网-通信网耦合分区方案，4 个分区内的配电功率平衡图和通信信息量平衡图如图 8 和 9 所示。在分区内功率平衡方面，若分区由上级电源与构网型电源共同支撑，则根据分区节点的负荷需求、构网型电源剩余容量和线路状态进行合理调配。随着施工队抢修工作的推进，后续时步微电网间会发生动态合并，因此图 8(b)—(d)所示部分时步功率输出和负荷需求皆为 0，通信分区中同理对应时步下不再有信息量；对于通信分区信息量平衡方面，则需要遵循分区内信息产生与流出量、内部处理量、存储量之和的平衡。其中内部处理量为主站、移动通信车、智能终端在分区内支撑的信息量构成。若智能终端的处理能力无法满足节点间信息需求，则会限制该分区规模或等待移动通信车提供额外的临时通信支撑。

所提耦合分区策略会根据网络拓扑和故障信息的更新，动态调整分区和应急资源的调度，实现分区内功率平衡与通信资源的合理分配。在通信节点尚未完全恢复或算力受限时，则通过移动通信车提供必要的远程接入，协调分区间的信息流分配，从而显著提高灾后初期的负荷恢复速度与稳定性。

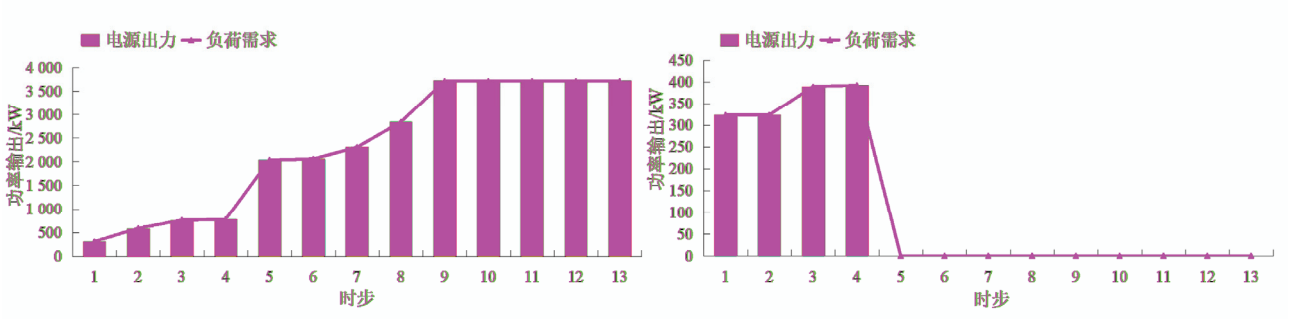
3.3　对比分析

为进一步验证所提方法的优越性，将本文策略与其他 3 种不考虑施工队、移动通信车和配电网-通信网协同恢复的方法进行对比。不同方法的负荷恢复曲线如图 10 所示。图中结果表明，本文所提方法在负荷恢复速度和恢复效果上均明显优于其他 3 种方法。同时，对于通信覆盖和信息流传输也进行了观察，结果显示本文方法能够更早恢复远端节点的数据交互。

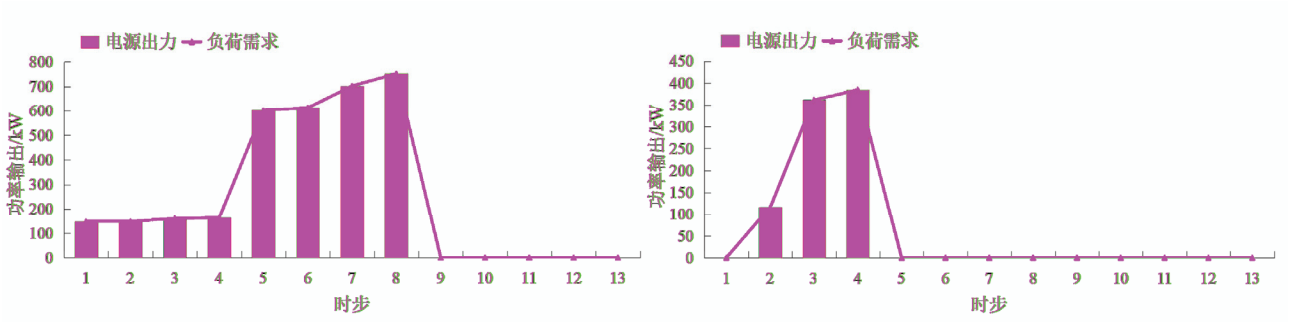
对于不考虑施工队的方法，由于缺少对故障线路的及时修复，线路受损后无法重建供电通路，限制了配电网的负荷分配与功率平衡。仅当移动通信车于时步 2 接入时，区域通信恢复并基于耦合情况分区Ⅳ有效，负荷恢复量提升至约 40%。但由于通信线路持续故障，移动通信车只能维持原接入位置，信息流与能量流均受到限制，负荷恢复量在后续时步几乎保持恒定，难以进一步提高。由此，施工队在快速修复配电和通信线路方面具有关键作用，能够为负荷的进一步恢复奠定基础。

对于不考虑移动通信车的方法，依赖固定资源与施工队的逐步修复，初期因通信中断导致故障信息传输受阻，主站无法及时下达调度指令，导致负荷恢复速度明显滞后。

对于不考虑配电网-通信网协同恢复方法，由于独立恢复配电网和通信网，未利用耦合分区策略优先保障关键负荷与通信功能，且缺乏网络间信息交



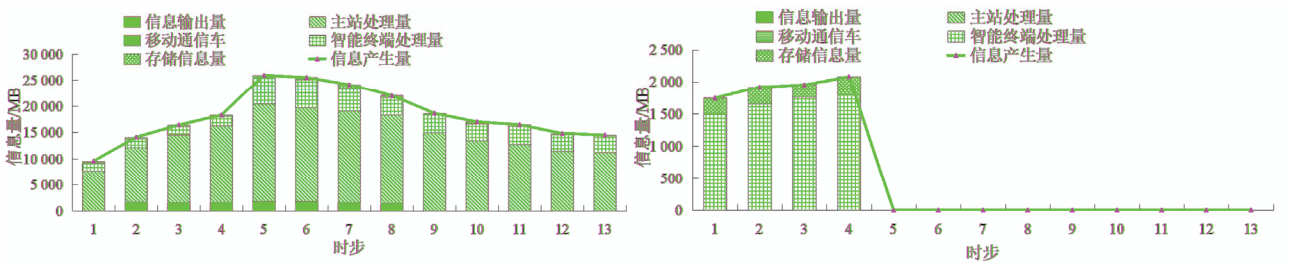
(a) 耦合分区 I (b) 耦合分区 II



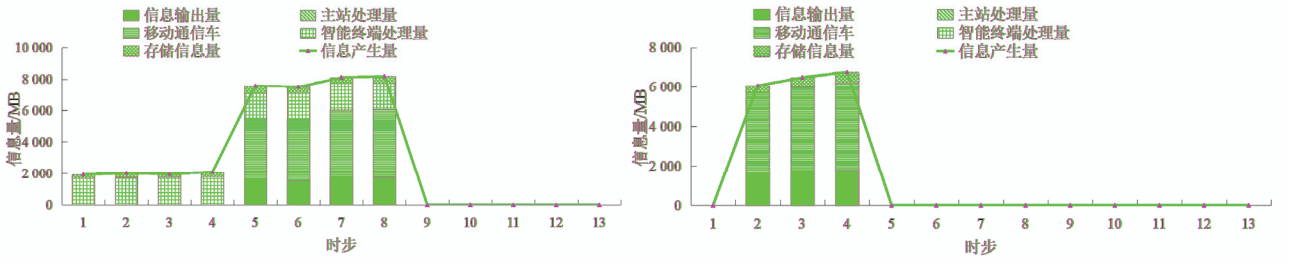
(c) 耦合分区III (d) 耦合分区IV

图 8 耦合分区功率平衡图

Fig.8 Diagram of coupling partition power balance



(a) 耦合分区 I (b) 耦合分区 II



(c) 耦合分区III (d) 耦合分区IV

图 9 耦合分区信息量平衡图

Fig.9 Diagram of coupling partition information balance

互机制，灾情数据与修复进度无法有效共享，导致恢复过程缺乏整体协同性。图中显示该方法在前 8 个时步内负荷恢复量增长缓慢，显著低于本文方法。

相比之下，本文通过移动通信车与施工队的协同调度，结合耦合分区策略对有限资源进行分配，逐步恢复关键负荷与通信功能，从而提升灾后恢复速度和资源利用效率。从图中可以看出，本文方法在初期的负荷恢复速度方面明显优于其他三种方法，时步 4 即实现了约 62%的负荷恢复量，在中后期负荷恢复率持续提升，并于时步 9 达到接近 100%的恢复效果，充分体现了本方法在配电信息物理系统灾后协同恢复中的显著优势。

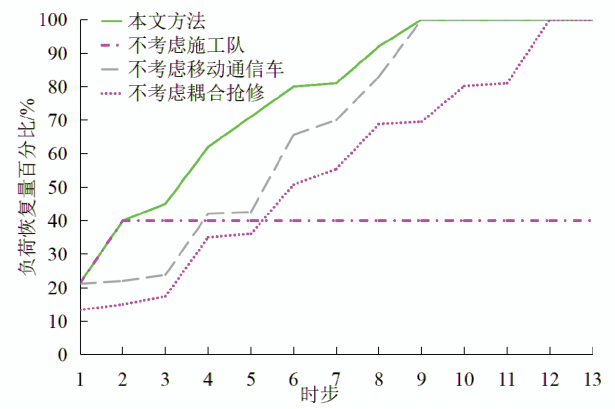


图 10　不同方法的负荷恢复结果对比示意

Fig.10　Load recovery over time of different strategies

4　结论

本文针对极端灾害下配电信息物理系统的灾后供电保障与快速恢复问题，提出了基于能量流-信息流耦合的配电信息物理系统孤岛微网分区优化方法。相关结论如下。

1）建立了通信网络的信息流模型，充分考虑通信数据、链路带宽和智能终端算力等因素，以保障孤岛微网内部的通信与控制需求。

2）通过采用构网型电源保障重要负荷供电，利用智能终端提供孤岛内局域通信，实现电力微网与通信局域网的耦合分区。该分区方案可根据线路修复进度和资源调度情况进行动态调整，最大限度减少重要负荷损失。

3）所提策略充分发挥能量流-信息流耦合优势，相较于缺少考虑应急资源或配电网通信网协同的恢复策略，在显著提升负荷恢复速度的同时，有效降低灾害造成的停电和通信中断损失。

后续研究将进一步聚焦恢复资源的预部署策略，旨在灾前在系统薄弱环节合理配置应急资源，进一步缩短灾后响应时间；考虑结合状态相似性方法，提升模型在大规模场景和多灾害情景中的求解效率，从而进一步拓展适用范围；同时，结合精细化通信网模型和实际通信场景参数的应用，探索应对多重扰动的韧性提升方案，为极端灾害下配电信息物理系统的高效恢复提供更完备的策略。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 李　晓，李满礼，倪　明. 配电信息物理系统分析与控制研究综述[J]. 中国电力，2020，53(1)：11-21.
LI Xiao, LI Manli, NI Ming. A review of analysis and control of cyber physical distribution system[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 11-21.

[2] 盛万兴，刘科研，李　昭，等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：1-18.
SHENG Wanxing, LIU Keyan, LI Zhao, et al. Review of basic theory and methods of morphological evolution and safe & efficient operation of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 1-18.

[3] 韩金侠，刘　恒，丁慧霞，等. 考虑信息物理融合的 5G+卫星与输配电业务适配性分析[J]. 电力信息与通信技术，2023，21(9)：8-14.
HAN Jinxia, LIU Heng, DING Huixia, et al. Adaptability analysis for 5G+ satellite and power transmission and distribution service with consideration of cyber-physical system[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(9): 8-14.

[4] 龚　立，王先培，田　猛，等. 电力信息物理系统韧性的概念与提升策略研究进展[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(14)：169-187.
GONG Li, WANG Xianpei, TIAN Meng, et al. Concepts and research progress on enhancement strategies for cyber physical power system resilience[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 169-187.

[5] 湖南省人民政府门户网站. 平江通信信号恢复八成[EB/OL]. (2024-07-05)[2025-04-29]. https://www.hunan.gov.cn/topic/fx2024/hnxd24/202407/t20240705_33347660.html.
Hunan Provincial People's Government Portal Website. 80% of Pingjiang's communication signals restored[EB/OL]. (2024-07-05)[2025-04-29]. https://www.hunan.gov.cn/topic/fx2024/hnxd24/202407/t20240705_33347660. html.

[6] 澎湃新闻. 与"汛"竞速，中央企业驰援湖南平江抗洪救灾![EB/OL]. (2024-07-03)[2025-04-29]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_27956746.
The Paper. Racing against the flood: central enterprises rush to aid flood relief in Pingjiang, Hunan! [EB/OL]. (2024-07-03)[2025-04-29]. https: //www. thepaper. cn/newsDetail_forward_27956746.

[7] 腾讯网. 台风"摩羯"致海南 35 千伏及以上变电站停运 79 座，正加快抢修[EB/OL]. (2024-09-07)[2025-04-29]. https://news.qq.com/rain/a/20240907A07WCG00.
Tencent. com. Typhoon "Yagi" caused 79 substations of 35 kV and above in Hainan to shut down[EB/OL]. (2024-09-07)[2025-04-29]. https: //news. qq. com/rain/a/20240907A07WCG00.

[8] 海南省通信管理局. 抗击超强台风"摩羯" 海南省信息通信行业全力做好应急通信保障[EB/OL]. (2024-09-09)[2025-04-29].https: //hnca.miit.gov.cn/xwdt/gzdt/art/2024/art_d055f7a684624da981ad48c-55bb97183. html.
Hainan Provincial Communications Administration. In the battle against the super Typhoon "Yagi", the information and communication industry in Hainan province made all-out efforts to ensure emergency communication[EB/OL]. (2024-09-07)[2025-04-29]. https: //hnca. miit. gov. cn/xwdt/gzdt/art/2024/art_d055f7a684624da981ad48c55bb97183. html.

[9] 王子欣，苗世洪，郭舒毓，等. 基于复杂系统理论的电力通信耦合网络模型构建及节点重要度评估方法[J]. 高电压技术，2022，48(1)：84-94.
WANG Zixin, MIAO Shihong, GUO Shuyu, et al. Construction of power communication coupling network model and node importance evaluation method based on complex system theory[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 84-94.

[10] 张俊潇，高　崇，劳永钊，等. 基于混沌二进制麻雀搜索的配电网故障恢复方法[J]. 高电压技术，2023，49(增刊 1)：247-253.
ZHANG Junxiao, GAO Chong, LAO Yongzhao, et al. A fault recovery

method for distribution networks based on chaos binary sparrow search[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(Supplement 1): 247-253.

[11] WU H, XIE Y Y, XU Y, et al. Robust coordination of repair and dispatch resources for post-disaster service restoration of the distribution system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107611.

[12] 杨祺铭，李更丰，别朝红，等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2764-2774.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.

[13] 徐　岩，郭佳睿，马天祥. 考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5516-5528.
XU Yan, GUO Jiarui, MA Tianxiang. Coordinated optimization of fault recovery and emergency repair for distribution network considering resilience improvement[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5516-5528.

[14] SHI Q X, LI F X, DONG J, et al. Co-optimization of repairs and dynamic network reconfiguration for improved distribution system resilience[J]. Applied Energy, 2022, 318: 119245.

[15] 彭佳盛，文云峰，梁晓锐，等. 基于弹性系数的配电网重构与故障抢修协同优化方法[J]. 电力系统自动化，2025，49(6)：88-95.
PENG Jiasheng, WEN Yunfeng, LIANG Xiaorui, et al. Resilience coefficient based collaborative optimization method of distribution network reconfiguration and fault repair[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(6): 88-95.

[16] YANG Z C, HAN J, LI L, et al. Research of islanding operation and fault recovery strategies of distribution network considering uncertainty of new energy[J]. Electronics, 2023, 12(20): 4230.

[17] 罗　伟，李长城，琚上纯，等. 考虑孤岛融合的配电系统多源协同恢复策略[J]. 电网技术，2022，46(4)：1485-1493.
LUO Wei, LI Changcheng, JU Shangchun, et al. Multi-source cooperative restoration strategy for distribution system considering islanding integration[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1485-1493.

[18] 李明昊，杨祺铭，李更丰，等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术，2024，50(1)：93-104.
LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 93-104.

[19] LIN Y L, CHEN B, WANG J H, et al. A combined repair crew dispatch problem for resilient electric and natural gas system considering reconfiguration and DG islanding[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2755-2767.

[20] BAHRAMI M, VAKILIAN M, FARZIN H, et al. Multi-step island formation and repair dispatch reinforced by mutual assistance after natural disasters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106572.

[21] 刘文霞，马　铁，杨梦瑶，等. 严重通信故障下主动配电系统分布式电源应急运行策略优化[J]. 中国电机工程学报，2020，40(3)：754-764.
LIU Wenxia, MA Tie, YANG Mengyao, et al. Contingency optimization strategy for distributed generations of active distribution network under serious communication failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 754-764.

[22] LIU W X, GONG Q, HAN H, et al. Reliability modeling and evaluation of active cyber physical distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7096-7108.

[23] WANG C Y, YAN M Y, PANG K Y, et al. Cyber-physical interdependent restoration scheduling for active distribution network via ad hoc wireless communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3413-3426.

[24] 叶学顺，李　昭，刘科研，等. 信息物理并发故障下的配电网供电恢复方法[J]. 电力信息与通信技术，2024，22(9)：18-25.
YE Xueshun, LI Zhao, LIU Keyan, et al. Distribution network power restoration under cyber-physical concurrent faults[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(9): 18-25.

[25] TIAN M, DONG Z C, GONG L, et al. Coordinated repair crew dispatch problem for cyber-physical distribution system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2288-2300.

[26] SUN X C, CHEN J, ZHAO H R, et al. Sequential disaster recovery strategy for resilient distribution network based on cyber–physical collaborative optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1173-1187.

[27] YE Z G, CHEN C, LIU R H, et al. Boost distribution system restoration with emergency communication vehicles considering cyber-physical interdependence[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1262-1275.

[28] CHAUDHURI N R, CHAKRABORTY D, CHAUDHURI B. Damping control in power systems under constrained communication bandwidth: A predictor corrector strategy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(1): 223-231.

[29] DORJI S, STONIER A A, PETER G, et al. An extensive critique on smart grid technologies: recent advancements, key challenges, and future directions[J]. Technologies, 2023, 11(3): 81.

[30] 郑琨龄. 配电信息物理系统弹性评估及提升方法研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2024.
ZHENG Kunling. Research on resilience evaluation and promotion method of cyber-physical distribution systems[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2024.

[31] ZHANG Z, PANG B, LIU S, et al. Enhanced intelligent terminal unit under smart distribution network[J]. Electrical Engineering, 2023, 105(2): 1199-1207.



刘预立
2001—，女，硕士生
主要从事配电信息物理系统故障恢复方面的研究工作
E-mail: yuliliu@tju.edu.cn

LIU Yuli



吴　昊(通信作者)
1995—，男，博士
主要从事配电网韧性提升和灾后恢复方面的研究工作
E-mail: hwu@tju.edu.cn

WU Hao
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期　2025-05-06　修回日期　2025-07-14　　编辑　陈　蔓

附录 A

前述模型中含有非线性项，为了确保模型能够求解，需要对其进行线性化处理，线性化处理如下所示：

$$\begin{cases} k_{i,j}=\dfrac{P_{\mathrm{F}}\cdot G_{i,j,t}}{N_0} \\ C'_e=B'_e\ \log_2\left(1+\dfrac{e_{i,j}}{B'_e}\right) \\ B'_{i,j,t}=\sum\limits_{e=1}^{m}\lambda_e B'_e \\ C'_{i,j,t}=\sum\limits_{e=1}^{m}\lambda_e C'_e \\ \sum\limits_{e=1}^{m}\lambda_e=1 \end{cases} \tag{A1}$$

$$\begin{cases} R_{i,j,t}=\sum\limits_{e=1}^{p}\mu_e R_e \\ r'_e=\dfrac{1}{R_e} \\ r'_{i,j,t}=\sum\limits_{e=1}^{p}\mu_e r'_e \\ \sum\limits_{e=1}^{p}\mu_e=1 \end{cases} \tag{A2}$$

$$\begin{cases} \eta_{i,j,t}=\dfrac{f_{i,j,t}}{C_{i,j,t}} \\ \vartheta_{i,j,t}=\dfrac{L_{packet}}{R_{i,j,t}} \\ w_\eta=f_{i,j,t} \\ w_u\geq f_{\min}\cdot C_{i,j,t}+f_{i,j,t}\cdot C_{\min}-f_{\min}\cdot C_{\min} \\ w_u\geq f_{\max}\cdot C_{i,j,t}+f_{i,j,t}\cdot C_{\max}-f_{\max}\cdot C_{\max} \\ w_u\leq f_{\min}\cdot C_{i,j,t}+f_{i,j,t}\cdot C_{\max}-f_{\min}\cdot C_{\max} \\ w_u\leq f_{\max}\cdot C_{i,j,t}+f_{i,j,t}\cdot C_{\min}-f_{\max}\cdot C_{\min} \\ \sum\left(\eta_{i,j,t}+\vartheta_{i,j,t}+\dfrac{d_{i,j}}{v_{\mathrm{pr}}}\right)\leq T_{\mathrm{D}}^{\max} \end{cases} \tag{A3}$$

式中：式(A1)采用分段线性近似方法，引入权重变量 λ_e，将实际带宽 $B'_{i,j,t}$ 和容量 $C'_{i,j,t}$ 表示为带宽范围内多个点的线性组合，实现线性插值。式(A2)引入辅助变量 $r'_{i,j,t}$ 和 μ_e 进行线性插值，将原约束转化为线性求和形式。式(A3)对变量分别线性化，并使用 McCormick 包络，将所有非线性项转化为线性约束。

在模型线性化完成之后，孤岛微网分区优化模型转换为混合整数线性规划模型，可以利用 CPLEX 软件进行求解。