第50卷 第2期 2026年1月25日
DOI：10.7500/AEPS20250520008
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 50 No. 2 Jan. 25，2026

山火灾害下天地一体化配电系统信息物理协同恢复策略

仇世元[1,2]，周 全[1,2]，张 轩[1,2]，王 晗[3]，周天念[4]，帅智康[1,2]
（1. 湖南大学电气与信息工程学院，湖南省长沙市 410082；
2. 电能高效高质转化全国重点实验室（湖南大学），湖南省长沙市 410082；
3. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室，上海非碳基能源转换与利用研究院（上海交通大学），上海市 200240；
4. 国网湖南省电力有限公司防灾减灾中心（电网防灾减灾全国重点实验室），湖南省长沙市 410129）

摘要： 山火灾害发生后，快速掌握灾情并合理调度应急资源，有助于缩短配电系统恢复时间，实现重要负荷快速恢复。为加速配电系统灾后恢复进程，引入融合低轨卫星互联网的天地一体化网络架构，构建信息感知-火情响应-负荷恢复的三层恢复体系，并以最小化负荷损失、感知时间与卫星终端部署成本为目标，提出山火灾害下配电系统信息物理协同恢复模型。首先，构建多源耦合火点监测模型，评估灾区火情等级与传播趋势；其次，协同空中与地面灭火队伍，建立多约束灭火调度模型，优化火源扑灭路径与时间；然后，提出考虑节点状态可知性、电源拓扑可达性及低轨卫星通信终端部署策略的负荷恢复模型。最后，采用线性化的两阶段优化方法提升求解效率。基于IEEE 33节点系统与10节点感知网络进行了仿真，结果验证了所提方法在缩短恢复时间、提升恢复总量与优化资源配置方面的有效性与优越性。

关键词： 山火灾害；应急资源；负荷恢复；天地一体化网络；韧性；信息物理系统；配电系统

0 引言

近年来，温度升高和干旱天气加剧了火灾发生频率，造成严重的电力中断事故[1-2]。2025年1月，美国洛杉矶发生“伊顿”山火，部分输电线路因高温或短路故障停运，导致洛杉矶地区电力供应中断[3]；2022年8月，中国重庆山火多点暴发，导致累计2条500 kV线路、72个通信基站与132条光缆故障[4]。同时，在山区、偏远乡镇、风光场站密布等地区，配电系统正逐渐转变为微网核心，并成为新型电力系统“源-网-荷-储”结构中的关键环节[5]。然而，山火事件频发反映出配电系统应对山火极端灾害能力不足，凸显了提升配电系统韧性的重要性[6-7]。

现有的电力山火防治研究工作主要通过集成火灾模型到电力系统，进行电力山火风险评估与预测[8-9]。然而，在极端山火灾害造成的大范围倒塔、线路损坏等事故中，配电通信网络往往同时受到损害，影响配电系统的恢复策略制定[10]。现有部分研究虽已考虑多资源协同恢复，但仍存在仅考虑物理应急资源[11]、信息物理耦合程度不深[12]、恢复方案缺少全局性[13]等问题。因此，研究配电系统信息层与物理层的深度耦合特性以及山火灾后恢复机理，有助于加速配电系统恢复，提升新型电力系统韧性。

天地一体化网络集成卫星、无人机和地面网络形成多维立体信息网络[14]，可以有效弥补新型电力系统信息化能力短板，其在实际场景中的工程可行性也已得到初步验证。2023年某地山火灾害应急恢复中，研究人员部署的数据平台依托卫星开展火点图像提取任务，同时利用某卫星完成通信中继，实现灾中远距离感知与信息回传的一体化处理[15]。同时，低轨卫星通信能力实现突破性提升[16]。相比于地球同步轨道（GEO）或中轨道（MEO）卫星系统，低轨卫星星座低成本、低时延、部署灵活的特点使其逐步走向日常灾害应急恢复、边远地区通信等场景[17]，为实现电力系统在山火灾害下的状态监测与远程调控提供了新路径[18]。

综上所述，现有配电系统在山火灾害负荷恢复期间，尚未形成对信息系统与物理设施的有效协同机制，忽略了山火灾害场景下通信基础设施受损、信息孤岛频发的现实挑战。同时，低轨卫星互联网技

收稿日期：2025-05-20；修回日期：2025-08-19。
上网日期：2025-09-09。
国家重点研发计划资助项目（2024YFB2409100）；国家自然科学基金面上项目（52477091）；国家杰出青年科学基金资助项目（52125705）；湖南省科技创新计划资助项目（2024RC1038）。

中国知网 https://www.cnki.net

术为系统状态感知与远动控制提供了全新的支撑手段。然而，现有研究普遍未对天地一体化网络，特别是低轨卫星星座资源在电力系统恢复中的调度特性进行建模与分析。为此，本文提出面向山火灾害的天地一体化配电系统恢复框架，构建火情感知-灾害响应-负荷恢复协同模型，引入卫星终端部署策略，联合感知潮流状态约束，建立多时刻负荷恢复混合整数线性规划（mixed-integer linear programming，MILP）模型，实现状态感知与负荷恢复的闭环联动。

1　天地一体化配电系统火灾恢复框架

面对突发的山火灾害，地面抢修资源与天地一体化网络资源的高效协同调度是加快配电系统应急恢复过程的关键。本文所提出的天地一体化配电系统信息感知-火情响应-负荷恢复三层协同框架如图1所示。

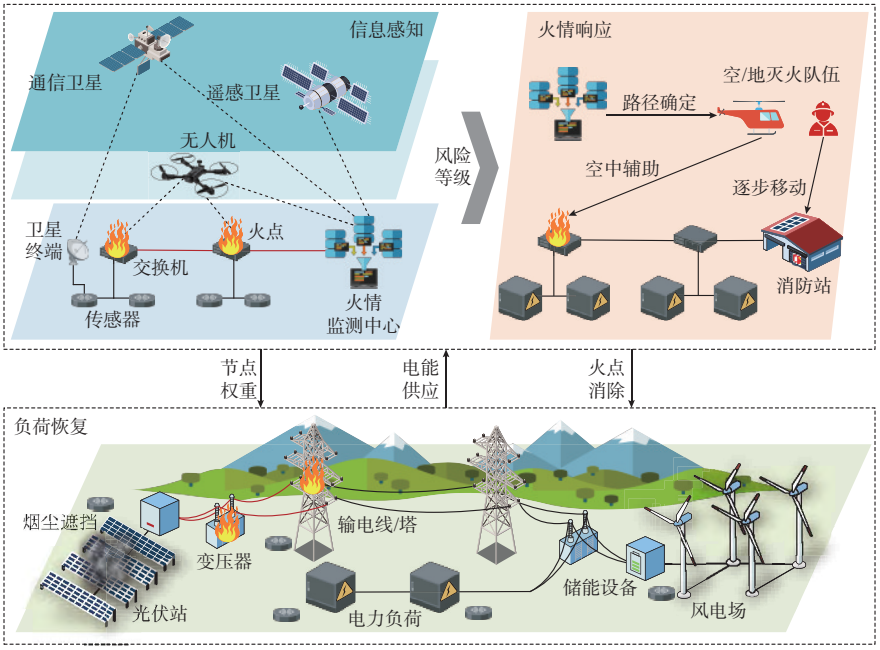


图1　山火灾害下配电系统信息物理协同恢复框架

Fig. 1　Cyber-physical collaborative restoration framework for distribution systems under wildfire disasters

1）火情感知体系：火情监测是电力调度判断节点状态与资源可达性的前提。本文将灾区火点感知过程视为一个由机巢节点集合U^{F}和火点观测节点集合M^{F}组成的动态观测系统。其中，观测节点包括部署于配电设备的地面传感器、交换机和火情监测中心。地面传感网络布设于输电线路杆塔、光伏站及配电设施周边，利用温度、烟雾等传感器监测本地火情，并通过窄带无线通信传输数据，以掌握配电系统受损状态；无人机作为空中基站，在火情初期支持交换机与火情监测中心之间的低延迟数据交换[19]；遥感卫星基于多光谱与热红外成像技术提供气象数据和植被状况，实现火点监测及风险评估[20-21]；卫星通信可接入已部署卫星终端但并未恢复信息通路的配电节点，提前感知节点状态。

2）火情处置响应：此环节为后续电力负荷恢复创造安全窗口。当监测中心接收到遥感卫星及无人机基站反馈的灾区数据后，根据火点等级、火势蔓延趋势及资源可达性合理分配灭火任务，安排出发节点与到达时限，确定火灾风险等级与系统恢复方案，协同调度灭火资源，完成火源控制。灭火资源主要包括空中灭火队伍和地面灭火队伍两种，其中，空中灭火队伍为直升机，具备快速响应与区域穿越能力，可搭载灭火剂在火点附近悬停喷洒，适用于地形复杂区域，但受限于作业时长；地面灭火队伍负责近地灭火与隔离带构建，需满足连续路径限制及灭火顺序逻辑。火点未被扑灭前，感知节点无法恢复通信，影响配电节点状态感知。

3）电力负荷恢复：山火蔓延至配电线路引发线路跳闸，导致输电线路保护设备动作并自动切断电源，以防止线路故障进一步扩大。灾后恢复过程中，将配电系统视为一个由母线节点集合N^{P}和输电线路集合L^{P}组成的拓扑结构。配电系统各节点接有负荷，部分节点接入黑启动电源，并假设各线路两端均设有远动开关，一条输电线路闭合需该线路两端的远动开关皆完成闭合。因此，输电线路的闭合需保证其两端的配电节点状态已知。配电节点火情消

中国知网　https://www.cnki.net

除后，监测控制中心可通过下发指令，联动配电主站系统与馈线终端单元(feeder terminal unti，FTU)/配电终端单元(distribution terminal unit，DTU)等终端设备，控制断路器的远程闭合操作，接入分布式黑启动电源构建局部辐射状微电网，实现区域负荷恢复。为保证配电系统的运行安全和频率稳定，单孤岛仅能包含一个黑启动电源；考虑到构网型新能源储能系统相较于传统能源部署更灵活[22]，且已有工程实践验证了其在偏远地区灾后恢复中的韧性支撑优势与孤岛运行性能[23]，选取“风光储”联合系统作为黑启动电源。

所提系统的具体恢复流程如图2所示。

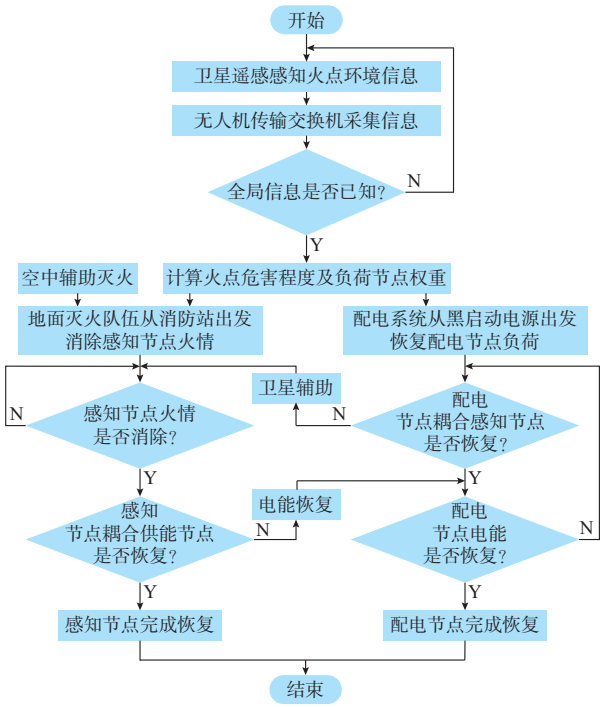


图2　山火灾害下配电系统信息物理协同恢复流程图
Fig. 2　Flow chart of cyber-physical collaborative restoration for distribution systems under wildfire disasters

2　天地一体化配电系统火灾信息物理协同恢复优化模型

基于上述信息感知-火情响应-负荷恢复三层协同恢复框架，本文对各时刻负荷恢复总量建立优化问题并求解，以实现快速灾情处置与负荷恢复。

2.1　火情火点监测模型

2.1.1　天地一体化火灾风险评估模型

基于遥感卫星提供的地形地势、气象数据、植被状况等数据，结合无人机基站传输的传感器环境数据及配电节点电气数据，建立天地一体化配电系统火灾风险评估模型。

1)文献[24]提出的火灾蔓延模型在大多数温带林区与亚热带山地场景中的适用性良好，且已在中国多个山地林区的森林火灾建模中被广泛使用[25]。因此，本文基于该火灾蔓延模型建立配电节点i的火灾风险指数$R_{i,1}$，具体如下：

$$R_{ij}=K_{\mathrm{S}}R_0\exp(\sigma V_j\cos\theta_{ij})\exp(\rho\tan\varphi_{ij}^{1,2}) \tag{1}$$

$$\omega_{ij}^{\mathrm{F}}=\exp\left(-\gamma\frac{d_{ij}}{R_{ij}}\right) \tag{2}$$

$$R_{i,1}=\max_j\omega_{ij}^{\mathrm{F}} \tag{3}$$

式中：R_{ij}为火点j对于配电节点i的火势传播速度；K_{S}为可燃物更正系数，由周边植被类型、植被覆盖情况及植被含水量确定；R_0为无风无坡基础蔓延速度；σ和ρ为地形经验系数；V_j为火点j所在地风速；θ_{ij}为火蔓延方向与火点j至配电节点i方向夹角；φ_{ij}为火点j至配电节点i路径的平均坡度；γ为时间衰减系数；d_{ij}为火点j到配电节点i的距离；ω_{ij}^{F}为火点j对配电节点i的火灾风险影响系数。

2)配电节点负荷权重指数$R_{i,2}$的建立方法具体见附录A第A1节。

综合上述指标建立综合火灾风险评估模型，确定配电节点i的综合火灾风险系数ω_i，具体如下：

$$\omega_i=\alpha R_{i,1}+\beta R_{i,2} \tag{4}$$

式中：α和β分别为火灾风险指数$R_{i,1}$和配电节点负荷权重指数$R_{i,2}$的权重系数。

由于国家电网有限公司及多地电力公司在山火等灾害风险区域已推进基于多类型传感器的冗余部署策略，本文不考虑传感器故障导致的天地一体化火灾风险评估模型的数据缺失问题[26]。

2.1.2　无人机空中基站模型

1)无人机移动路径约束具体如下：

$$x_{aa}^{\mathrm{U}}=\begin{cases}1 & \forall a\in U^{\mathrm{F}}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{5}$$

$$x_{ab}^{\mathrm{U}}+x_{ba}^{\mathrm{U}}\leqslant 1\quad\forall a,b\in M^{\mathrm{F}},a\neq b \tag{6}$$

$$\sum_{h=1}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ha}^{\mathrm{U}}\leqslant\sum_{b=1,a\neq b}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}}\leqslant n_{\max}^{\mathrm{U}}\quad\forall a\in U^{\mathrm{F}} \tag{7}$$

$$\sum_{b=1}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}}\leqslant\sum_{h=1}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ha}^{\mathrm{U}}\leqslant 1\quad\forall a\in U^{\mathrm{F}} \tag{8}$$

式中：$N^{\mathrm{F}}=U^{\mathrm{F}}\cup M^{\mathrm{F}}$为感知节点集合；$a,b\in N^{\mathrm{F}}$为感知节点；$x_{ab}^{\mathrm{U}}$为表示无人机移动方向的0-1变量，无人机沿路径从节点a移动到节点b时，$x_{ab}^{\mathrm{U}}=1$；n^{F}为无人机所需观测节点总数；$n_{\max}^{\mathrm{U}}$为无人机总数。

式(5)约束无人机只能从机巢节点出发；式(6)约束无人机对同一感知节点最多只观测一次；式(7)限制同一时刻进行感知任务的无人机总数；式(8)限

中国知网　https://www.cnki.net

制单个感知节点最多只能被1架无人机观测。

2）无人机恢复时间约束具体如下：

$$t_a^{\mathrm{U,c}}=1 \quad \forall a\in U^{\mathrm{F}} \tag{9}$$

$$t_a^{\mathrm{U,c}}\leqslant t_a^{\mathrm{U,g}}\leqslant T+1 \quad \forall a\in M^{\mathrm{F}} \tag{10}$$

$$t_b^{\mathrm{U,c}}=(t_a^{\mathrm{U,g}}+T_{ab}^{\mathrm{U}})x_{ab}^{\mathrm{U}} \quad \forall a\in N^{\mathrm{F}},b\in M^{\mathrm{F}} \tag{11}$$

$$t_b^{\mathrm{U,g}}\geqslant t_b^{\mathrm{U,c}}+T_b^{\mathrm{F}}-M\left(1-\sum_{a=1,a\neq b}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}}\right) \quad b\in M^{\mathrm{F}} \tag{12}$$

$$t_b^{\mathrm{U,g}}\leqslant t_b^{\mathrm{U,c}}+T_b^{\mathrm{F}}+M\left(1-\sum_{a=1,a\neq b}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}}\right) \quad b\in M^{\mathrm{F}} \tag{13}$$

$$t_b^{\mathrm{U,c}}=(T+1)\sum_{a=1,a\neq b}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}} \quad b\in M^{\mathrm{F}} \tag{14}$$

$$t_{\mathrm{done}}^{\mathrm{U}}\geqslant t_a^{\mathrm{U,g}}-M\left(1-\sum_{a=1,a\neq b}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}}\right) \quad b\in M^{\mathrm{F}} \tag{15}$$

式中：$t_a^{\mathrm{U,c}}$和$t_a^{\mathrm{U,g}}$分别为无人机到达和离开观测点a的时刻；T为分析总时间；$T+1$为设置的时间长度最大值；t为分析时刻；T_{ab}^{U}为无人机从a点移动到b点的飞行时长；T_b^{F}为无人机完成b点观测任务所需停留的时长；$t_{\mathrm{done}}^{\mathrm{U}}$为无人机完成访问的时间；$M$为一个充分大的常数。

式(9)约束无人机离开机巢的时刻为1；式(10)约束无人机离开观测节点的时刻要大于到达的时刻；式(11)表示若无人机从a点前往b点，则无人机到达b点的时刻等于到达a点的时刻加上两者之间的移动时长；式(12)和式(13)约束无人机离开观测节点的时刻等于到达时刻加上悬浮时间；式(14)表示若某一观测节点没有被任何无人机访问，则其到达时刻取最大工作时长；式(15)约束无人机访问完成时间不小于无人机离开任意观测节点的时间。

3）无人机电池能量约束具体如下：

$$E_a^{\mathrm{U}}=0 \quad \forall a\in U^{\mathrm{F}} \tag{16}$$

$$t_a^{\mathrm{U}}=t_a^{\mathrm{U,g}}-t_a^{\mathrm{U,c}} \quad \forall a\in M^{\mathrm{F}} \tag{17}$$

$$E_b^{\mathrm{U}}=[E_a^{\mathrm{U}}+p^{\mathrm{U}}(T_{ab}^{\mathrm{F}}+t_a^{\mathrm{U}})]x_{ab}^{\mathrm{U}} \quad \forall a\in U^{\mathrm{F}},b\in M^{\mathrm{F}} \tag{18}$$

$$E_a^{\mathrm{U}}\leqslant E \quad \forall a\in N^{\mathrm{F}} \tag{19}$$

$$T^{\mathrm{U}}=\frac{E}{p^{\mathrm{U}}} \tag{20}$$

式中：E_a^{U}为无人机到达观测节点a时已消耗的电池能量；t_a^{U}为无人机在节点a的观测时长；T_{ab}^{F}为无人机从a点飞行至b点花费的飞行时长；p^{U}为无人机的单位时间电池能量消耗；E为电池容量；T^{U}为无人机的续航时长。

式(16)限制无人机出发前没有能量消耗；式(17)计算无人机观测时长为离开时刻与到达时刻之差；式(18)约束若无人机飞过路径(a,b)，则无人机到达b点时已消耗的能量等于到达a点时消耗的能量加上在a点完成观测任务以及移动所消耗的能量；式(19)限制无人机所消耗的总能量应小于它所携带的电池能量；式(20)约束无人机的续航时间等于无人机总能量与单位时间能耗的比值。

2.1.3　交换机工作模型

本文基于网络流理论建模地面通信网络，即交换机需要与监测中心存在通信链路，同时需具备足够电能才能正常工作；有线通信线路中数据流量不能超过线路容量，且在任何时刻流入流出单一感知节点的流量相等。

1）交换机供能约束。交换机收集地面传感网络数据，并通过无人机空中基站中继传输至火情监测中心，其正常工作依赖于与其耦合的配电节点供应一定比例的电能。建立交换机供能约束如下：

$$u_{a,t}^{\mathrm{F,P}}=1 \quad a\in N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}},\forall t \tag{21}$$

$$u_{a,t}^{\mathrm{F,P}}=\max(D_{i,t}^{\mathrm{F,P}},D_{j,t}^{\mathrm{F,P}}) \quad \forall a\notin N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}},\forall i,j\in N_a^{\mathrm{F,P}},\forall t \tag{22}$$

$$u_{a,t-1}^{\mathrm{F,P}}\leqslant u_{a,t}^{\mathrm{F,P}} \quad \forall a\in N^{\mathrm{F}},\forall t\geqslant 2 \tag{23}$$

$$T+1-\sum_{t=1}^{T+1}u_{a,t}^{\mathrm{F,P}}=t_a^{\mathrm{F,P}} \quad \forall a\in N^{\mathrm{F}} \tag{24}$$

$$t_a^{\mathrm{F}}\geqslant t_a^{\mathrm{F,P}} \quad \forall a\in N^{\mathrm{F}} \tag{25}$$

$$D_{i,t}^{\mathrm{F,P}}=\begin{cases}1 & \dfrac{P_{i,t}^{\mathrm{L}}}{P_i^{\mathrm{L,m}}}\geqslant\lambda,\forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall t\\ 0 & \dfrac{P_{i,t}^{\mathrm{L}}}{P_i^{\mathrm{L,m}}}<\lambda,\forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall t\end{cases} \tag{26}$$

式中：$u_{a,t}^{\mathrm{F,P}}$为表示感知节点a在时刻t电能供应恢复状态的0-1变量，$u_{a,t}^{\mathrm{F,P}}=1$为感知节点a在时刻t已恢复供能，反之则未恢复供能；$N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}}$为监测中心所在节点集合，无须考虑供电问题；$N_a^{\mathrm{F,P}}$为感知节点$a$处交换机供电的配电节点集合；$N^{\mathrm{P}}$为配电节点集合；$P_{i,t}^{\mathrm{L}}$为配电节点$i$在时刻$t$的有功负荷恢复量；$P_i^{\mathrm{L,m}}$为配电节点$i$处可恢复负荷的最大值；$D_{i,t}^{\mathrm{F,P}}$为表示配电节点$i$在时刻$t$电能供应状态的0-1变量，$D_{i,t}^{\mathrm{F,P}}=1$时该节点在时刻$t$的负荷恢复比例大于交换机所需最小电能比例$\lambda$，交换机可以正常工作，否则无法正常工作；$t_a^{\mathrm{F,P}}$为感知节点$a$恢复电能供应的时刻；$t_a^{\mathrm{F}}$为感知节点$a$完成恢复的时刻。

式(21)和式(22)约束感知节点a处的交换机恢复供电的时间为与其耦合的供电节点中最早达到最小电能要求的时间，而火情监测中心不考虑供电问题；式(23)和式(24)约束了感知节点a恢复正常工作的时刻与各时刻恢复状态的关系；式(25)约束感

中国知网　https://www.cnki.net

知节点 a 完全恢复的时间应晚于其供电恢复的时间；式(26)约束交换机需要达到一定比例电能供应才能恢复正常工作状态。

2)通信流量约束。在交换机满足供能条件且系统火情已完全消除后，地面通信网络可恢复灾前状态，满足以下约束：

$$\sum_{t=1}^{T+1} u_{b,t}^{\mathrm{F}} \leqslant M \sum_{b=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{F}} \quad \forall b \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{27}$$

$$T+1-\sum_{t=1}^{T+1} u_{a,t}^{\mathrm{F}} = t_a^{\mathrm{F}} \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{28}$$

$$u_{a,t-1}^{\mathrm{F}} \leqslant u_{a,t}^{\mathrm{F}} \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \geqslant 2 \tag{29}$$

式中：$u_{a,t}^{\mathrm{F}}$ 为表示感知节点 a 在时刻 t 恢复状态的0-1变量，$u_{a,t}^{\mathrm{F}}=1$ 时感知节点 a 在时刻 t 已恢复地面有线线路连接；y_{ab}^{F} 为表示灭火队伍移动路径的0-1变量，$y_{ab}^{\mathrm{F}}=1$ 时存在地面或空中灭火队伍从节点 b 出发移动至节点 a。

式(27)表示感知节点在灭火队伍移动路径上才会被恢复；式(28)和式(29)约束感知节点在恢复后一直保持正常工作。

由于互联交换机的有线通信网络存在流量限制，构建如下约束：

$$t_a^{\mathrm{F}} \leqslant t_i^{\mathrm{P,F}} \leqslant T+1 \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}}, a = N_i^{\mathrm{F}} \tag{30}$$

$$T+1-\sum_{t=1}^{T+1} u_{i,t}^{\mathrm{P,F}} = t_i^{\mathrm{P,F}} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}} \tag{31}$$

$$u_{i,t-1}^{\mathrm{P,F}} \leqslant u_{i,t}^{\mathrm{P,F}} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}}, \forall t \geqslant 2 \tag{32}$$

式中：$u_{i,t}^{\mathrm{P,F}}$ 为表示配电节点 i 在时刻 t 通信恢复状态的0-1变量，$u_{i,t}^{\mathrm{P,F}}=1$ 为配电节点 i 在时刻 t 已恢复通信；$t_i^{\mathrm{P,F}}$ 为配电节点 i 通过交换机传输传感信息的时刻；N_i^{F} 为与配电节点 i 耦合的感知节点。

此外，考虑有线线路流量限制建立如下约束：

$$f_{a,t}^{\mathrm{I}} = \sum_{i \in N_a^{\mathrm{P}}} (u_{i,t}^{\mathrm{P,F}} f_i^{\mathrm{C}}) \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{33}$$

$$v_{g,t}^{\mathrm{C}} = u_{a,t}^{\mathrm{F}} u_{b,t}^{\mathrm{F}} (y_{ab}^{\mathrm{F}} + y_{ba}^{\mathrm{F}}) \quad \forall a, b \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{34}$$

$$0 \leqslant |f_{g,t}| \leqslant f_g^{\max} v_{g,t}^{\mathrm{C}} \quad \forall a, b \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{35}$$

$$f_{b,t}^{\mathrm{O}} = \sum_{a=1}^{n^{\mathrm{F}}} (f_{a,t}^{\mathrm{I}}) \quad b \in N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{36}$$

$$f_{a,t}^{\mathrm{O}} = 0 \quad b \notin N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{37}$$

$$f_{a,t}^{\mathrm{I}} = f_{a,t}^{\mathrm{O}} + \sum_{g \in L^{\mathrm{F}}} (f_{g,t} d_{ab}^{\mathrm{F,g}}) \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}}, \forall g \in L^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{38}$$

式中：L^{F} 为地面通信网络中的有线线路集合；N_a^{P} 为感知节点 a 处交换机所连接的配电节点集合；f_i^{C} 为配电节点 i 处的数据流量；$f_{a,t}^{\mathrm{I}}$ 和 $f_{a,t}^{\mathrm{O}}$ 分别为感知节点 a 在时刻 t 输入和输出的数据流量；$f_{g,t}$ 为感知网络有线线路 g 在时刻 t 的线路流量；$v_{g,t}^{\mathrm{C}}$ 为表示有线线路 g 在时刻 t 恢复情况的0-1变量，$v_{g,t}^{\mathrm{C}}=1$ 为线路已恢复，否则为未恢复；$f_g^{\max}$ 为通过有线线路 g 的最大数据流量；$d_{ab}^{\mathrm{F,g}}$ 为表示线路 g 和节点 a、b 连接关系的0-1变量，若线路 g 从节点 a 连接节点 b，则 $d_{ab}^{\mathrm{F,g}}=1$，否则 $d_{ab}^{\mathrm{F,g}}=0$。

式(33)保持各感知节点与传感器间的流量平衡，即其输入的数据流量为与其连接且状态已知的配电节点产生的总数据流量；式(34)表示若线路 g 连接的两节点在时刻 t 均已恢复，则线路在时刻 t 恢复；式(35)约束了已恢复线路可传输的最大数据流量；式(36)和式(37)限制数据流量仅在监测中心输出，且其值为当前时刻需处理的数据总量，其余感知节点无数据输出；式(38)保持各感知节点的流量平衡。

2.1.4　卫星协同恢复模型

本文中的传感器网络通过部署卫星通信终端实现数据上行，配电节点与卫星终端一一对应，用于将配电系统的量测与状态数据回传至调控中心。考虑到当前低轨卫星星座“星链”已部署超7 000颗卫星，且终端具备星间中继链路与快速星间切换能力，在全球大部分区域可实现连续覆盖，能够在视距中断后实现100 ms级链路重建[27]，满足分钟级数据传输与策略制定。因此，本文不再以轨道可视窗口和传输链路稳定性作为核心限制因素。同时，为保障灾后调控过程中的状态感知连续性与远动命令的有效传达，对卫星通信的终端部署、信号保持时长、带宽与并发连接数进行建模，具体如下。

1)卫星终端部署约束。卫星通信终端需在配电节点提前部署，否则不可接入卫星网络，约束如下：

$$1 \leqslant t_i^{\mathrm{S,c}} \leqslant t_i^{\mathrm{S,g}} \leqslant T+1 \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}} \tag{39}$$

$$t_i^{\mathrm{S,c}} \geqslant T+1-MD_i^{\mathrm{S}} \quad \forall i \in N_{\mathrm{S}}^{\mathrm{P}} \tag{40}$$

式中：$t_i^{\mathrm{S,c}}$、$t_i^{\mathrm{S,g}}$ 分别为配电节点 i 卫星通信信号接入时间和切除时间，若 $t_i^{\mathrm{S,c}} = t_i^{\mathrm{S,g}} = T+1$，则节点 i 在恢复过程中无卫星接入；D_i^{S} 为表示卫星通信终端部署的0-1变量，$D_i^{\mathrm{S}}=1$ 为在配电节点 i 部署终端；$N_{\mathrm{S}}^{\mathrm{P}}$ 为已提前部署卫星终端的配电节点集合。

式(39)约束了卫星通信信号接入和切除时间的上下限，且卫星通信信号的切除时间应晚于接入时间；式(40)约束了若配电节点 i 未部署通信终端，则无法接入卫星通信。

2)卫星终端通信流量约束。由于单颗卫星可服务的用户及流量有限，建立卫星通信终端流量约束为：

$$u_{i,t}^{\mathrm{S}} = \begin{cases} 1 & t_i^{\mathrm{S,c}} \leqslant t \leqslant t_i^{\mathrm{S,g}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{41}$$

中国知网　https://www.cnki.net

$$\sum_{i=1}^{n^{\mathrm{P}}} u_{i,t}^{\mathrm{S}} \leqslant n_{\max}^{\mathrm{S}} \quad \forall t \tag{42}$$

$$\sum_{i=1}^{n^{\mathrm{P}}} (f_i^{\mathrm{C}} u_{i,t}^{\mathrm{S}}) \leqslant f_{\max}^{\mathrm{S}} \quad \forall t \tag{43}$$

式中：n^{P}为配电节点数；$u_{i,t}^{\mathrm{S}}$为表示配电节点i在时刻t通信卫星接入状态的0-1变量，$u_{i,t}^{\mathrm{S}}=1$为配电节点i在时刻t存在卫星通信信号，否则未接入卫星通信信号；$n_{\max}^{\mathrm{S}}$和$f_{\max}^{\mathrm{S}}$分别为卫星终端数量和最大流量限制。

式(41)限制在卫星接入与离开时间之间，配电节点i接入卫星通信；式(42)和式(43)约束同一时间内接入卫星通信的最大节点数和最大流量。

3)卫星通信信号持续时间约束。配电节点所接入的卫星通信链路必须持续至其所耦合的交换机节点完全恢复通信与供能条件之后，方可安全退出，以确保灾后通信切换的平稳性与控制闭环的连续性。卫星通信信号持续时间约束如下：

$$t_i^{\mathrm{S,g}} \geqslant t_i^{\mathrm{P,F}} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}} \tag{44}$$

部署有卫星通信终端的配电节点无须依赖交换机即可将传感器数据转发给监测中心，完成配电节点状态提前感知，同时减轻通信网络流量传输压力。部署卫星通信终端的通信网络模型如图3所示。

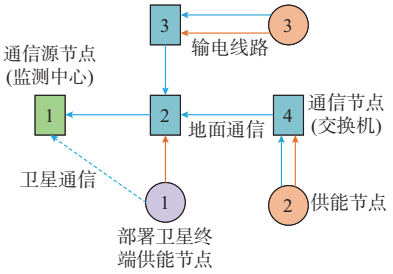


图3　部署卫星通信终端的通信网络模型

Fig. 3　Communication network model with satellite communication terminals

2.2　火情响应处置模型

火情扑灭与节点环境安全是负荷恢复的必要前置条件，灭火队伍根据各火点的风险等级及路径可达性等参数进行调度，完成灭火任务；仅当灭火成功并确认节点安全后，才允许闭合相应配电线路并接入负荷。

2.2.1　灭火队伍移动路径约束

1)地面灭火队伍移动路径约束。地面灭火队伍从消防站所在节点出发，逐步移动至火点，移动路径受到地形地理限制、火势蔓延情况等因素影响，故只能在调度中心指定路径进行移动。地面灭火队伍移动路径约束具体如下：

$$\sum_{b \in N^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{G}} = 1 \quad \forall a \in N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}},\ a \neq b \tag{45}$$

$$\sum_{a \in N^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{G}} = 0 \quad \forall b \in N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}}\ a \neq b \tag{46}$$

$$y_{ab}^{\mathrm{G}} + y_{ba}^{\mathrm{G}} \leqslant 1 \quad \forall a, b \in N^{\mathrm{F}}, a \neq b \tag{47}$$

$$\sum_{a=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{G}} \leqslant 1 \quad \forall b \in N^{\mathrm{F}} \tag{48}$$

$$\sum_{b=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{G}} \leqslant \sum_{c=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ca}^{\mathrm{G}} \leqslant n^{\mathrm{F}} \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}} \tag{49}$$

$$y_{ab}^{\mathrm{G}} \leqslant A_{ab}^{\mathrm{F}} \quad \forall a, b \in N^{\mathrm{F}} \tag{50}$$

式中：y_{ab}^{G}为表示地面队伍移动路径的0-1变量，$y_{ab}^{\mathrm{G}}=1$时地面灭火队伍从感知节点a移动至节点b；$N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}}$为消防站所在的感知节点集合，本文设定消防站与监测中心在感知网络中位置相同；A_{ab}^{F}为感知网络中地面灭火队伍的可移动路径。

式(45)表示地面灭火队伍以消防站为起点；式(46)表示消防站无法作为灭火队伍移动目的地；式(47)约束灭火队伍单向移动，提高工作效率；式(48)表示同一火点仅被灭火一次；式(49)约束只有火点消除后灭火队伍才可继续移动；式(50)表示灭火队伍移动路径受到环境因素限制，仅可在提前制定的可移动路径上进行移动。

2)空中灭火队伍移动路径约束。空中灭火队伍从消防站所在节点出发，径直前往所需灭火感知节点，具体路径约束如下：

$$\sum_{b=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{H}} = \begin{cases} 1 & \forall a \in N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}}, a \neq b \\ 0 & \forall a \notin N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}}, a \neq b \end{cases} \tag{51}$$

$$\sum_{b=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{H}} \leqslant n_{\max}^{\mathrm{H}} \quad \forall a \in N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}} \tag{52}$$

$$\sum_{a=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{H}} \leqslant 1 \quad \forall b \in N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}} \tag{53}$$

$$\sum_{a=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{H}} = y_b^{\mathrm{rh}} \quad \forall b \in N^{\mathrm{F}} \tag{54}$$

式中：y_{ab}^{H}为表示空中灭火队伍移动路径的0-1变量，$y_{ab}^{\mathrm{H}}=1$时空中灭火队伍从节点a移动至节点b；$n_{\max}^{\mathrm{H}}$为最大灭火队伍数量；y_b^{rh}为表示是否有消防直升机辅助灭火的0-1变量，$y_b^{\mathrm{rh}}=1$时，感知节点b火情由空中灭火队伍消除。

式(51)限制空中灭火队伍只能从消防站出发；式(52)限制执行灭火任务的消防直升机总数；式(53)约束感知节点火情只能被空中灭火队伍扑灭一次。

2.2.2　灭火队伍灭火时间约束

灭火队伍通过阻止感知网络中火点向邻近节点

中国知网　https://www.cnki.net

蔓延进行灭火工作，具体约束如下：

$$\sum_{r=1}^{n^{\mathrm{R}}} D_a^r = 1 \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}} \tag{55}$$

$$T_b^{\mathrm{F,min}} = \sum_{r=1}^{n^{\mathrm{R}}} T_r D_a^r \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}} \tag{56}$$

$$\sum_{t=1}^{T} z_{a,t} = 1 \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}} \tag{57}$$

$$t_a^{\mathrm{F}} \geqslant t - M(1 - z_{a,t}) \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{58}$$

$$t_a^{\mathrm{F}} \leqslant t + M(1 - z_{a,t}) \quad \forall a \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{59}$$

$$\sum_{a=1}^{n^{\mathrm{F}}} z_{a,t} \leqslant 1 \quad a \in N^{\mathrm{F}}, \forall t \tag{60}$$

$$t_1^{\mathrm{F}} = t_{\mathrm{done}}^{\mathrm{U}} + T_1^{\mathrm{F}} \quad T_1^{\mathrm{F}} = 0 \tag{61}$$

$$t_b^{\mathrm{F}} \geqslant t_a^{\mathrm{F}} + T_b^{\mathrm{F,min}} - M(1 - y_{ab}^{\mathrm{F}}) \quad \forall a, b \in N^{\mathrm{F}} \tag{62}$$

$$y_b^{\mathrm{rh}} + \sum_{a=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{F}} = 1 \quad \forall b \notin N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}} \tag{63}$$

$$t_b^{\mathrm{F}} \geqslant T + 1 - M\left(\sum_{a=1}^{n^{\mathrm{F}}} y_{ab}^{\mathrm{F}} + y_b^{\mathrm{rh}}\right) \quad \forall b \notin N_{\mathrm{M}}^{\mathrm{F}} \tag{64}$$

式中：n^{R}为模型划分的火灾风险等级数；t_a^{F}为灭火队伍完成感知节点a灭火工作的时间；$T_b^{\mathrm{F,min}}$为感知节点b的最小灭火耗时，取决于火灾风险等级；D_a^r为表示感知节点a是否属于第r级火灾的0-1变量，$D_a^r=1$时，节点a属于第r级火灾，否则不属于第r级火灾；T_r为第r级火灾所需的灭火时间；$z_{a,t}$为表示节点a在时刻t灭火状态的0-1变量，$z_{a,t}=1$时感知节点a火情在时刻t消除，否则未消除；t_1^{F}为灭火队伍完成消防站灭火工作的时间；T_1^{F}为消防站的灭火时间。

式(55)约束每个感知节点只能有一种火灾风险等级；式(56)依据火灾风险等级计算每个感知节点所需的灭火时间；式(57)—式(59)计算灭火队伍完成灭火所需的时间；式(60)约束地面灭火队伍同一时间只能在不多于一个感知节点灭火；式(61)约束消防站为灭火队伍起点，且无须灭火；式(62)约束只有上游节点完成灭火时才能进行下游灭火，模拟阻止火灾蔓延的过程，且灭火时间应该大于该节点所需的最小灭火时间；式(63)约束感知节点只能由空中或地面一种灭火队伍扑灭火点；式(64)约束只有存在至少一条灭火路径时，节点才能被灭火。

2.3 配电系统恢复模型

2.3.1 配电系统恢复路径及时间约束

与灭火队伍相似，配电系统恢复从黑启动电源节点开始，通过控制远动开关闭合逐步恢复待恢复配电节点并约束恢复负荷所需时间，具体见附录A第A2节。

2.3.2 配电系统潮流状态约束

对于各黑启动电源，由于山火烟雾对光伏发电能力的显著影响[28]，考虑光伏站和风电场作为配电系统构网电源，二者出力模型相似[29]，仅考虑当光伏站被损毁无法满足系统需求时，接入风电场作为黑启动电源[30]。假设风电与光伏节点已配套部署满足构网需求的储能系统，以支撑黑启动阶段的电压/频率调节与短时能量补偿，并通过控制策略保持输出稳定性。建立光伏站和风电场出力约束如下：

$$P_i^{\mathrm{PV,min}} \kappa_1^i \kappa_2^i \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{PV}} \leqslant P_i^{\mathrm{PV,max}} \kappa_1^i \kappa_2^i \quad \forall i \in N_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{65}$$

$$Q_i^{\mathrm{PV,min}} \kappa_1^i \kappa_2^i \leqslant Q_{i,t}^{\mathrm{PV}} \leqslant Q_i^{\mathrm{PV,max}} \kappa_1^i \kappa_2^i \quad \forall i \in N_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{66}$$

$$R_i^{\mathrm{PV}-} \tau \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{PV}} - P_{i,t-1}^{\mathrm{PV}} \leqslant R_i^{\mathrm{PV}+} \tau \quad \forall i \in N_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{P}}, \forall t \geqslant 2 \tag{67}$$

$$P_i^{\mathrm{W,min}} \kappa_3^i \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{W}} \leqslant P_i^{\mathrm{W,max}} \kappa_3^i \quad \forall i \in N_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{68}$$

$$Q_i^{\mathrm{W,min}} \kappa_3^i \leqslant Q_{i,t}^{\mathrm{W}} \leqslant Q_i^{\mathrm{W,max}} \kappa_3^i \quad \forall i \in N_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{69}$$

$$R_i^{\mathrm{W}-} \tau \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{W}} - P_{i,t-1}^{\mathrm{W}} \leqslant R_i^{\mathrm{W}+} \tau \quad \forall i \in N_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}, \forall t \geqslant 2 \tag{70}$$

式中：τ为模型分析的时间间隔；$N_{\mathrm{PV}}^{\mathrm{P}}$和$N_{\mathrm{W}}^{\mathrm{P}}$分别为光伏站和风电场黑启动电源集合；$P_{i,t}^{\mathrm{PV}}$、$Q_{i,t}^{\mathrm{PV}}$和$P_{i,t}^{\mathrm{W}}$、$Q_{i,t}^{\mathrm{W}}$分别为节点$i$处光伏站和风电场在时刻$t$的有功、无功出力；$P_i^{\mathrm{PV,min}}$、$P_i^{\mathrm{PV,max}}$和$P_i^{\mathrm{W,min}}$、$P_i^{\mathrm{W,max}}$分别为节点$i$处光伏站和风电场的有功出力下限、上限；$Q_i^{\mathrm{PV,min}}$、$Q_i^{\mathrm{PV,max}}$和$Q_i^{\mathrm{W,min}}$、$Q_i^{\mathrm{W,max}}$分别为节点$i$处光伏站和风电场的无功出力下限、上限；$R_i^{\mathrm{PV}-}$、$R_i^{\mathrm{PV}+}$和$R_i^{\mathrm{W}-}$、$R_i^{\mathrm{W}+}$分别为节点$i$处光伏站和风电场最大下调、上调功率速率；$\kappa_1^i \in [0,1]$为节点$i$依据火点与风向模拟的烟雾遮挡因子；$\kappa_2^i$为表示节点$i$处光伏站是否未被山火损毁的0-1变量，$\kappa_2^i=1$时未被山火损毁，反之则被损毁；$\kappa_3^i$为风速对风电场出力的影响因子。

式(65)、式(66)和式(68)、式(69)分别约束了在山火灾害场景下光伏站和风电场的有功、无功出力；式(67)和式(70)分别约束了光伏站和风电场的爬坡速率。

对于配电系统中各待恢复的电力负荷，设置其满足如下约束：

$$0 \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{L}} \leqslant u_{i,t}^{\mathrm{P}} P_i^{\mathrm{L,m}} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{71}$$

$$Q_{i,t}^{\mathrm{L}} = \eta P_{i,t}^{\mathrm{L}} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{72}$$

$$P_{i,t-1}^{\mathrm{L}} \leqslant P_{i,t}^{\mathrm{L}} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}}, \forall t \geqslant 2 \tag{73}$$

式中：$u_{i,t}^{\mathrm{P}}$为表示配电节点i在时刻t恢复状态的0-1变量，$u_{i,t}^{\mathrm{P}}=1$时配电节点i在时刻t已恢复；$Q_{i,t}^{\mathrm{L}}$为配电节点i在时刻t的无功负荷恢复量；η为负荷的功率因数。

式(71)约束了各节点负荷恢复量的上、下限；

中国知网 https://www.cnki.net

式(72)约束了功率因数恒定情况下的有功、无功负荷恢复关系；式(73)约束了负荷恢复的稳定性，保证各节点的负荷恢复量随时间逐渐增加。

同时，本文基于线性Dist-Flow模型[31]，构建配电系统潮流约束，具体如附录A第A3节所示。

本文所建立的电力山火灾害下天地一体化配电信息物理协同恢复系统模型的约束耦合关系如附录B图B1所示。

2.4　目标函数

基于天地一体化配电系统火灾恢复框架，本文方法对各时刻负荷损失量、感知时间成本及卫星部署成本建立统一优化问题并求解，以实现天地一体化网络资源的有效利用及配电系统负荷恢复量的最大化。该优化问题的目标函数为最小化总负荷损失量、总感知时间成本及卫星部署成本，表达式如下：

$$\min c_{\text{loss}} + c_{\text{S}} + c_{\text{U}} \tag{74}$$

$$c_{\text{loss}} = -\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in N^{\text{P}}} \omega_{i,t} P_{i,t}^{\text{L}} \tau \tag{75}$$

$$c_{\text{S}} = \mu c_{\text{deploy}}^{\text{S}} \sum_{i\in N_{\text{S}}^{\text{P}}} D_i^{\text{S}} \tag{76}$$

$$c_{\text{U}} = \gamma c_{\text{time}}^{\text{U}} t_{\text{done}}^{\text{U}} \tag{77}$$

式中：c_{loss}为负荷损失成本；c_{S}为卫星终端部署成本；c_{U}为感知时间成本；$\omega_{i,t}$为配电节点i在时刻t的权重系数；γ为感知时间成本-负荷恢复量转化系数；$c_{\text{time}}^{\text{U}}$为感知时间成本；$\mu$为卫星部署成本-负荷恢复量转化系数；$c_{\text{deploy}}^{\text{S}}$为卫星部署成本。

3　基于天地一体化的配电系统恢复模型线性化及算法优化

3.1　约束线性化

由于上述天地一体化配电系统山火协同恢复模型中存在非线性约束，需将该优化问题的非线性约束条件线性化，使其等效为一个MILP问题。线性化处理方式如附录A第A4节所示。

3.2　两阶段目标函数

实际应急响应流程通常优先完成感知任务，为后续灭火与电力恢复任务提供准确的风险评估与路径规划依据。同时，由于无人机感知属于前置性任务，且当前设备带宽已基本满足局部区域内短时数据传输需求[32]，在建模中可近似认为感知过程中不存在显著流量瓶颈。在此基础上，为兼顾恢复调度策略优化的动态性与整体求解模型的计算可行性，本文将天地一体化协同恢复策略划分为两阶段建模与求解，分别聚焦于前期信息获取与后期负荷接入的策略优化目标。

1)第1阶段考虑对感知任务独立求解，建立感知任务模型，明确灭火响应开始时间。以总感知时间最短为目标构建优化问题，具体如下：

$\min t_{\text{done}}^{\text{U}}$

s.t. 无人机工作约束：

路径：式(5)—式(8)

时间：式(9)—式(10)、式(12)—式(13)、式(15)、附录A式(A24)—式(A25)

能量：式(16)—式(17)、式(19)—式(20)、附录A式(A26)

2)第2阶段为灭火救援及电力负荷恢复策略。根据求解第1阶段优化问题得到的无人机传输时间，构建山火灾害下天地一体化配电系统灭火及电力负荷恢复模型，具体如下：

$$\min\left(-\tau\sum_{t=1}^{T}\sum_{i\in N^{\text{P}}}\omega_i P_{i,t}^{\text{L}} + \mu c_{\text{deploy}}^{\text{S}}\sum_{i\in N_{\text{S}}^{\text{P}}} D_i^{\text{S}}\right)$$

s.t. 感知网络运行约束：

交换机供能：式(21)、式(23)—式(25)、式(A27)—式(A28)

通信流量：式(27)—式(38)

卫星终端部署：式(39)—式(40)

卫星终端通信流量：式(42)—式(43)、附录A式(A29)

卫星通信信号持续时间：式(44)

灭火队伍工作约束：

路径：式(45)—式(54)

时间：式(55)—式(64)

配电系统恢复约束：

路径：附录A式(A2)—式(A6)

时间：附录A式(A7)—式(A9)、式(A11)—式(A15)、式(A30)—式(A31)

潮流：式(65)—式(73)、附录A式(A16)—式(A17)、式(A19)—式(A23)、式(A35)

4　算例分析

4.1　算例系统

本文将改进的IEEE 33节点配电系统和10节点感知网络组合成一个信息物理耦合网络进行算例分析，感知网络和配电系统的拓扑结构及配电节点和感知节点间的耦合关系可参考文献[33]。

当前，星链系统支持单用户终端下行速率可达100～250 Mbit/s，上行速率约为10～40 Mbit/s，单

中国知网　https://www.cnki.net

终端最大带宽利用率约为2～5 MB/s,单终端月服务费用为800元,终端设备费用约为3 000元[34];国内“星网”系统正推进更低成本的部署模式。鉴于本文聚焦于配电系统灾害应急恢复,其通信需求以状态信息传输与命令下发为主,远低于家庭宽带或工业视频场景。参考星链等系统带宽能力与服务费用结构,本文设定配电网内可部署卫星通信终端的节点为节点3～4、13～15和31～33,卫星通信链路的流量限制为$f_{\max}^{S}$=2 MB/s,最大卫星通信连接配电网节点的数量限制为$n_{\max}^{S}$=3;卫星通信终端部署成本c_{deploy}^{S}=3 000元,部署卫星通信终端的成本-负荷恢复量转化系数μ=0.005(MW·min)/元。算例系统其余相关参数设置及假设见附录C。

本文使用Gurobi求解线性化后的MILP问题,对偶间隙设置为0.01%,时间间隔τ=10 min,时刻数T=25。仿真算例基于MATLAB R2022a计算,硬件环境为16 GB内存和Intel Core i5-9500中央处理器。仿真运行结果表明,协同恢复模型在上述硬件配置下总求解耗时为191.36 s,仿真结果分析如下。

4.2 无人机机巢部署、移动路径及相关参数

在第1阶段中,设置无人机数量为2台,为求解无人机机巢部署节点,将10节点感知网络平面图放在x-y坐标系中,并输入10个感知网络节点坐标求解无人机感知任务模型,以求解得到的2台无人机起点作为机巢部署点,得到无人机完成感知任务的最小时间为38.41 min;求解得到的无人机机巢位置及无人机移动路径如附录B图B2所示。根据无人机传输数据得到的感知网络节点位置、节点风速及节点植被参数如附录D表D1所示。

对项目区域样本数据进行筛选与处理后,确定适应区域样本数据的参数值。设置天地一体化配电系统火灾风险评估模型参数如下:R_0=0.007 m/s;σ和ρ分别设置为0.178 3和0.035 33;γ=0.005;配电节点负荷权重指数$\zeta_{i,1}$、$\zeta_{i,2}$、$\zeta_{i,3}$、$\zeta_{i,4}$、$\zeta_{i,5}$分别设置为0.3、0.2、0.2、0.2、0.1;α=0.5;β=0.3。根据感知节点参数及火灾风险评估模型,计算得到10节点感知网络各节点火灾风险系数及IEEE 33节点系统各配电节点负荷权重分别如附录D表D2和表D3所示。

根据感知网络节点火灾风险系数计算结果,本文将火灾风险分为4个等级,对应的火灾风险系数区间分别为[0, 0.1)、[0.1, 0.2)、[0.2, 0.3)、[0.3, 1],对应所需的灭火时间分别为10、20、30、40 min。此外,根据天地一体化火灾风险评估模型计算结果以及配电节点和感知节点耦合关系,黑启动电源接入节点1、15和33的火灾风险系数分别为0.138 2、0.159 4和0.401 1。其中,节点33为系统火灾风险最高节点,考虑此处光伏站已无法正常工作,由风电场代替光伏站提供出力,同时,根据与其耦合的感知节点7的风速,设置κ_3^{15}=1.25;考虑配电节点33处的光伏站受到火灾烟雾影响,设置κ_2^{15}=0.8。

4.3 卫星通信终端部署结果

基于第1阶段求解结果,输入灭火队伍出发时间为t=40 min,并分别在80、120、160 min时更新火灾风险系数,求解第2阶段优化问题。

根据第2阶段求解结果,得到卫星通信终端部署结果如附录D表D4所示。结果显示,共有3个配电节点部署了卫星通信终端,分别为节点31、32和33。节点31卫星通信在150 min时切除;节点32卫星通信直至配电系统修复完成切除;节点33卫星通信在190 min时切除。其中,配电节点33为黑启动电源所在节点,接入卫星通信后开始传输节点信息并消除火情影响,支撑配电系统恢复供电。

4.4 山火灾害下配电系统信息物理协同恢复结果

4.4.1 配电系统恢复结果分析

求解第2阶段协同恢复模型,得到电力山火灾害下天地一体化配电信息物理系统负荷恢复结果如图4所示。配电系统在灭火队伍消除火情的前提下逐渐控制线路闭合,其负荷恢复量逐步提高,最终在180 min时系统达到负荷恢复最大值。

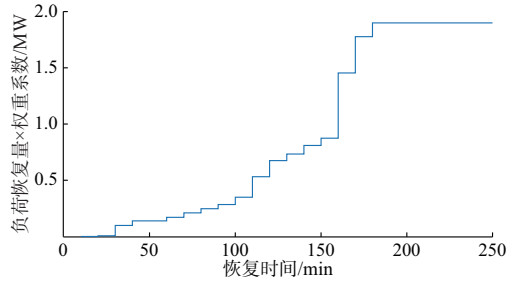


图4 配电系统各时刻负荷恢复结果

Fig. 4 Load restoration results of distribution system at every moment

图5展示了配电系统孤岛划分结果及线路开关闭合时间。由图5可知,配电系统共被划分为3个孤岛电网,分别由平衡节点1、黑启动电源节点15和33供电。其中,平衡节点1为节点1～14,19～25供电;黑启动电源节点15为节点16～18供电;黑启动电源节点33为节点30～32供电。由图5可知,配电节点31～33因部署有卫星通信终端可提前完成状态感知,之间的远动开关也可提前闭合,完成负荷恢复。

中国知网 https://www.cnki.net

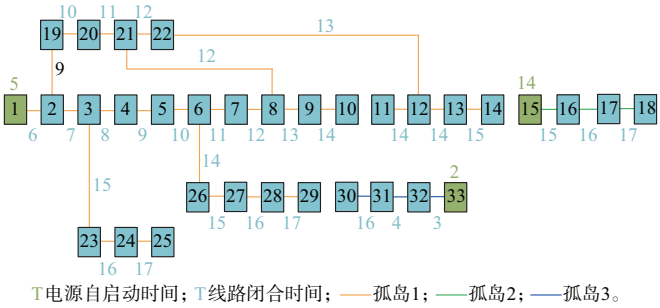


图5　配电系统孤岛划分结果及线路闭合时间
Fig. 5　Islanding partition results and line reconnection time of distribution system

图6展示了火点扑灭时间及火点扑灭实际耗时情况。由图6分析可知，灭火队伍从消防站出发，逐步移动至各个感知节点扑灭火情。灭火队伍在t=40 min时从消防站出发，在t=80 min时扑灭节点2和节点3处火点，随后依次扑灭4、5(9)、6(8)、10、7火点，最终在t=190 min时完成消除火点任务。由火点扑灭时间可知，空中灭火队伍以及地面灭火队伍的协同灭火作用使得灭火队伍具备同时扑灭两个火点的能力，加速了负荷恢复进程。

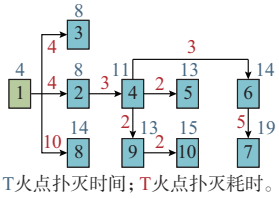


图6　火点扑灭时间及实际耗时
Fig. 6　Fire extinguishing time and actual time consumption

4.4.2　天地一体化配电系统信息物理耦合结果分析

首先，分析图5和图6配电节点负荷恢复时间及感知网络各火点扑灭时间可知，除配电节点31、32、33外，其余配电节点恢复时间均晚于其耦合感知节点恢复时间。

具体而言，对于未部署卫星通信终端的配电节点，节点19的上游配电节点2在t=60 min时完成恢复，但考虑到与其耦合的交换机(感知节点3)在t=80 min时才完成恢复，导致输电线路在t=90 min完成闭合；相似地，配电节点23的上游配电节点3在t=70 min时已完成恢复，但因与其耦合的感知节点8在t=140 min时才完成恢复，故输电线路在t=150 min完成闭合，恢复节点23。对于已部署卫星通信终端的配电节点，黑启动电源节点33在t=10 min时接入卫星通信，自启动完成后，在t=20 min时恢复负荷；此外，配电节点32、31分别在t=20 min及t=30 min时接入卫星通信，随后分别于t=30 min和t=40 min时完成负荷恢复；配电节点31、32因部署卫星通信终端，二者的恢复时间(t=40 min、t=30 min)均早于与其耦合的感知节点10、7的恢复时间(t=150 min、t=190 min)，而配电节点30由于未部署卫星通信终端，则需等待感知节点10恢复完成后，在t=160 min时才完成负荷恢复。由此可知，已部署卫星终端的配电节点可借助卫星通信加速状态感知恢复，提前完成负荷恢复。

其次，感知网络数据传输情况及节点供能要求满足时间如附录B图B3所示。结合图6感知网络火点扑灭时间分析可知，感知节点需要同时满足火情消除和最小供能要求时才能完成恢复。具体而言，感知节点2、7、9、10分别在70、20、100、40 min时达到最小供能要求，而由于此时感知节点火情仍未消除，故需等待灭火队伍消除火情后才能完成恢复，恢复时间分别为80、190、130、150 min。此外，完成感知网络恢复后，各线路流量均低于10 MB/s，满足其最大容量限制。

4.5　有/无火灾风险评估模型恢复结果对比

为量化火灾风险评估模型对山火灾害下配电系统信息物理协同恢复策略的影响，本文分别设置：1)在t=40 min后，不再更新综合火灾风险系数，其余参数保持不变，得到静态火灾风险评估模型下的系统加权负荷恢复结果；2)将火灾风险评估模型所得配电节点负荷权重替换为文献[33]所设置的负荷权重，其余参数保持不变，得到无火灾风险评估模型的配电系统负荷恢复结果。具体恢复效果对比结果如图7所示。需要说明的是，为简化模型输入数据量及验证模型的动态数据输入能力，动态风险评估模型在t=40 min后输入的数据由第1次输入数据经处理后得到。

对比3类火灾风险评估方式下的系统恢复曲线可以看出：采用静态火灾风险评估后，系统在t=

中国知网　https://www.cnki.net

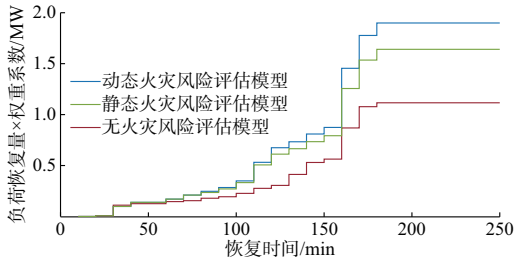


图7　有/无火灾风险评估模型的配电系统恢复结果对比
Fig. 7　Comparison of distribution system restoration results with and without fire risk assessment model

40 min时加权负荷恢复量即超过无火灾风险评估模型情形，说明纳入初始火情评估有助于提前识别关键节点、优化负荷接入顺序；进一步，引入动态更新机制后，系统在t=80 min后持续保持高于静态风险评估模型的恢复量，表明通过实时更新火情演化信息调整负荷权重，有助于动态适应火势变化、提升资源调度效率与负荷恢复弹性。该结果验证了动态火情感知与权重更新机制在山火灾害环境下配电系统信息物理协同恢复中的显著优势。

4.6　部署/未部署卫星通信终端恢复结果对比

本文所提出的天地一体化配电系统信息物理协同恢复模型中的卫星通信资源采用模块化建模方式。为量化部署卫星通信终端对山火灾害下配电系统信息物理协同恢复策略的影响，本文将卫星部署节点集合设置为空集，其余参数保持不变，得到部署和未部署卫星通信终端的配电系统负荷恢复结果如图8所示，未部署卫星终端时配电系统孤岛划分结果及线路闭合时间如附录B图B4所示。

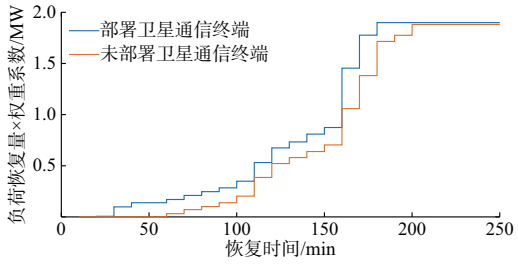


图8　部署/未部署卫星通信终端的配电系统恢复结果对比
Fig. 8　Comparison of distribution system restoration results with and without satellite communication terminals

对比图8的两条恢复曲线可知，在部署卫星通信终端后，配电系统恢复过程中各时刻的加权负荷恢复量均大于未部署卫星通信终端的情况。由于卫星通信对于配电节点信息感知的辅助作用，部署卫星通信终端的配电系统能够在无人机完成感知任务时刻(t=40 min)前，t=30 min时开始负荷恢复，而未部署卫星通信终端的系统在t=60 min时才开始负荷恢复，即部署卫星通信终端后配电系统能够提前30 min开始恢复。同时，部署卫星通信终端后系统提前20 min完成负荷恢复工作，共缩短工作时间50 min。此外，部署卫星通信终端后，系统加权负荷恢复量提升了17.78 kW。

结合图5、图6和附录B图B4对比分析可知，未部署卫星通信终端配电系统时，配电系统仍划分为3个孤岛电网，分别由平衡节点1、黑启动电源节点15和33供电。其中，平衡节点1为配电节点1～12、19～30供电；黑启动电源节点15为节点14、16～18供电；黑启动电源节点33为配电节点32供电；配电节点33需等待其耦合交换机(感知节点7)完成恢复后才能开始恢复负荷；配电节点13未被恢复。

综合上述分析可知，低轨卫星互联网的引入为灾害环境下的配电系统恢复提供了全新路径，具备跨域覆盖、快速部署与灵活接入等特性。通过对其通信能力的系统建模与优化调度，能有效提升系统恢复策略制定的空间与时间弹性。

5　结语

本文考虑电力山火灾害的特点、天地一体化网络资源的协同作用，对信息感知-火情响应-负荷恢复过程进行建模，通过线性化及分阶段求解等手段将优化模型转化为较易求解的MILP形式，并以IEEE 33节点配电系统和10节点感知网络算例验证了该方法的有效性。主要结论如下：

1)针对山火灾害中配电系统通信中断问题，提出综合考虑低轨卫星互联网在灾害环境下的可接入性与星地通信能力边界，构建包含星地接入限制、信号保持约束、带宽冲突调度机制的卫星协同建模方法。同时，与配电系统和感知网络间的供能耦合、信息耦合机制融合建模，刻画出山火灾害下配电系统信息物理协同机制，并支持基于不同区域现有资源配置的模型灵活调整。

2)针对山火灾害下配电系统恢复路径缺乏全局性与时序协调的问题，综合天地一体化网络感知信息，提出面向配电信息物理系统山火灾害应急恢复场景的恢复策略，制定火情响应与电力恢复的多时刻全局时序性方案，指导配电系统信息物理协同恢复，提升山火灾害环境下的配电系统韧性。

3)针对灾害环境下卫星通信资源利用效率低的问题，本文考虑低轨卫星互联网的通信性能特点，提出低轨卫星通信辅助的天地一体化网络感知信息传

中国知网　https://www.cnki.net

输机制，并结合动态火灾风险评估结果优化卫星终端部署，实现了山火灾害场景下配电系统信息传输能力与应急恢复效率的显著提升。

本文聚焦于电力山火灾害场景下的信息感知、火情响应与负荷恢复的协同优化机制，尚未深入考虑单设备故障失效、终端链路接入冲突、星地链路干扰等更高维度的通信动态约束问题，也未充分融合山火灾害蔓延的气象驱动演化模型与基于低轨卫星遥感的火情更新机制。因此，未来研究将围绕天地一体化网络下通信-导航-遥感三重协同机制开展深入建模与优化研究，结合气象驱动的动态火势模拟模型，探讨“动态链路调度-资源耦合演化-恢复路径重构”的闭环机制，为构建具备预测-决策-恢复联动能力的智能韧性电力系统提供理论支撑。

附录见本刊网络版，点击 http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20250520008，或扫描英文摘要后二维码，可阅读全文。

参 考 文 献

[1] 徐潇源，李佳琪，王晗，等.城市电力-交通系统韧性研究综述及展望[J].电力系统自动化，2024，48(23)：1-15.
XU Xiaoyuan, LI Jiaqi, WANG Han, et al. Review and prospect of research on urban power-transportation system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(23): 1-15.

[2] JAHN W, URBAN J L, REIN G. Powerlines and wildfires: overview, perspectives, and climate change: could there be more electricity blackouts in the future?[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2022, 20(1): 16-27.

[3] VAHEDI S, ZHAO J B, PIERRE B, et al. Wildfire and power grid nexus in a changing climate[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2025, 2: 225-243.

[4] 殷浩洋，刘东.山火灾害下电网安全形态的事件驱动模型与动态推演方法[J].中国电机工程学报，2024，44(20)：7911-7925.
YIN Haoyang, LIU Dong. Event-driven model and dynamic deduction method of security morphological of power system under wildfires[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 7911-7925.

[5] SHI Q X, LIU W X, ZENG B, et al. Enhancing distribution system resilience against extreme weather events: concept review, algorithm summary, and future vision[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 138: 107860.

[6] 任洪波，张宇晨，吴琼，等.面向韧性提升的综合能源系统规划与运行调度研究综述[J].电力系统自动化，2025，49(13)：16-31.
REN Hongbo, ZHANG Yuchen, WU Qiong, et al. Research review on planning and operation dispatch of integrated energy system for resilience enhancement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(13): 16-31.

[7] 罗佳怡，邢海军，全文斌，等.极端高温下新型电力系统韧性评估及差异化规划[J].电力系统自动化，2025，49(3)：135-144.
LUO Jiayi, XING Haijun, QUAN Wenbin, et al. Resilience assessment and differentiated planning of new power systems under extreme high temperatures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(3): 135-144.

[8] TRAKAS D N, HATZIARGYRIOU N D. Optimal distribution system operation for enhancing resilience against wildfires[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2): 2260-2271.

[9] SOHRABI B. Data-driven approaches for enhancing power grid reliability[D]. Denver, USA: University of Denver, 2024.

[10] 姚卓磊，黄文焘，余墨多，等.智能配电网电力-通信灾害故障动态协调恢复方法[J].电力系统自动化，2022，46(19)：87-94.
YAO Zhuolei, HUANG Wentao, YU Moduo, et al. Dynamic coordination recovery method for power-communication disaster fault in smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 87-94.

[11] 陶文嘉，冯亮，彭克，等.极端灾害下基于光储优化配置的配电网供电恢复方法[J].电力系统自动化，2025，49(7)：189-197.
TAO Wenjia, FENG Liang, PENG Ke, et al. Power restoration method for distribution network based on optimal configuration of photovoltaic and energy storage in extreme disaster scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(7): 189-197.

[12] 钟剑，陈晨，别朝红.基于SDN的配电网信息-物理协同恢复策略[J].中国电机工程学报，2024，44(11)：4193-4210.
ZHONG Jian, CHEN Chen, BIE Zhaohong. An SDN based cyber-physical integrated restoration scheme for distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4193-4210.

[13] 刘瑞环，陈晨，叶志刚，等.基于无人机应急通信的配电网灾后信息物理协同恢复策略[J].电网技术，2023，47(3)：1218-1230.
LIU Ruihuan, CHEN Chen, YE Zhigang, et al. Cooperative cyber-physical distribution system restoration with UAV-based emergency communications after disasters[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1218-1230.

[14] 汪春霆，翟立君，徐晓帆.天地一体化信息网络发展与展望[J].无线电通信技术，2020，46(5)：493-504.
WANG Chunting, ZHAI Lijun, XU Xiaofan. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 493-504.

[15] HE X L, XU C, TANG S Q, et al. Performance analysis of an aerial remote sensing platform based on real-time satellite communication and its application in natural disaster emergency response[J]. Remote Sensing, 2024, 16(15): 2866.

[16] DENG R Q, DI B Y, ZHANG H L, et al. Ultra-dense LEO satellite constellations: how many LEO satellites do we need?[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021,

中国知网　https://www.cnki.net

20(8): 4843-4857.

[17] 周全,周柯,金庆忍,等.卫星互联网赋能新型电力系统创新应用[J].电力系统自动化,2024,48(6):42-61.
ZHOU Quan, ZHOU Ke, JIN Qingren, et al. Novel applications of satellite internet enabling new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 42-61.

[18] 宋震,李勇,王洪涛,等.基于惯量响应的风储组合黑启动电源及其协调控制方法[J].电力系统自动化,2025,49(5):109-117.
SONG Zhen, LI Yong, WANG Hongtao, et al. Inertial response based wind turbine-energy storage combined black-start power source and its coordinated control method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(5): 109-117.

[19] PENG G Z, XIA Y X, ZHANG X J, et al. UAV-aided networks for emergency communications in areas with unevenly distributed users [J]. Journal of Communications and Information Networks, 2018, 3(4): 23-32.

[20] 孙伟伟,杨刚,陈超,等.中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析[J].遥感学报,2020,24(5):479-510.
SUN Weiwei, YANG Gang, CHEN Chao, et al. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(5): 479-510.

[21] BERGADO J R, PERSELLO C, REINKE K, et al. Predicting wildfire burns from big geodata using deep learning [J]. Safety Science, 2021, 140: 105276.

[22] 李建林,李昕然,邹菲,等.构网型储能典型工程示范及涉网特性检测技术[J/OL].高电压技术:1-15[2025-07-27].https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20242058.
LI Jianlin, LI Xinran, ZOU Fei, et al. Typical engineering demonstrations and grid-related characteristic detection technologies on grid-forming energy storage [J/OL]. High Voltage Engineering: 1-15[2025-07-27]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20242058.

[23] 朱亮,戚少博,杨波,等.低轨宽带卫星互联网承载电网业务应用研究[J].天地一体化信息网络,2023,4(2):103-113.
ZHU Liang, QI Shaobo, YANG Bo, et al. Application of the power grid business carrying on low earth orbit broadband satellite internet [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(2): 103-113.

[24] 王正非.山火初始蔓延速度测算法[J].山地研究,1983(2):42-51.
WANG Zhengfei. The measurement method of the wildfire initial spread rate[J]. Mountain Research, 1983(2): 42-51.

[25] 毛贤敏,徐文兴.林火蔓延速度计算方法的研究[J].辽宁气象,1991(1):9-13.
MAO Xianmin, XU Wenxing. Study on the calculation method of forest fire spread rate[J]. Liaoning Meteorology, 1991(1): 9-13.

[26] 杨淳岚,宁鑫,徐会凯,等.电网山火监测及风险预警技术研究综述[J].电网技术,2023,47(11):4765-4777.
YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4765-4777.

[27] LAGUNAS E, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Low-earth orbit satellite constellations for global communication network connectivity [J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2024, 1(10): 656-665.

[28] YANG W J, SPARROW S N, ASHTINE M, et al. Resilient by design: preventing wildfires and blackouts with microgrids [J]. Applied Energy, 2022, 313: 118793.

[29] PANG K Y, WANG C Y, HATZIARGYRIOU N D, et al. Microgrid formation and real-time scheduling of active distribution networks considering source-load stochasticity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(2): 2801-2813.

[30] YANG H B, RHODES N, YANG H X, et al. Multi-period power system risk minimization under wildfire disruptions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(5): 6305-6318.

[31] BARAN M E, WU F F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system [J]. IEEE Transactions on power Delivery, 1989, 4(1): 735-743.

[32] ZHANG H C, CHEN C, LEI S B, et al. Resilient distribution system restoration with communication recovery by drone small cells [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(2): 1325-1328.

[33] 王晗,胡喆,周全,等.基于天地一体化通信的配电网灾后信息-物理协同恢复框架与模型[J/OL].中国电机工程学报:1-15[2025-06-19]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20250311.1434.007.html.
WANG Han, HU Zhe, ZHOU Quan, et al. Cyber-physical collaborative restoration framework and model for power distribution networks with satellite-terrestrial communications [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-15[2025-06-19]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20250311.1434.007.html.

[34] STARLINK. Residential service plans [EB/OL]. [2025-05-18]. https://www.starlink.com/us/residential.

仇世元(2002—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统信息物理协同恢复、新型电力系统卫星互联网应用技术。E-mail:qiushiyuan0108@hnu.edu.cn

周 全(1989—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:天地一体化电力信息技术、通导遥融合卫星互联网电力应用技术。E-mail:zquan@hnu.edu.cn

张 轩(2002—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统信息物理协同恢复、新型电力系统卫星互联网应用技术。E-mail:zhangxuan1087@hnu.edu.cn

(编辑 章黎)

中国知网 https://www.cnki.net

Integrated Satellite-Terrestrial Cyber-Physical Collaborative Restoration Strategy for Distribution Systems Under Wildfire Disasters

QIU Shiyuan[1,2], *ZHOU Quan*[1,2], *ZHANG Xuan*[1,2], *WANG Han*[3], *ZHOU Tiannian*[4], *SHUAI Zhikang*[1,2]

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of High-efficiency and High-quality Conversion for Electric Power (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. Key Laboratory of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education, Shanghai Non-carbon Energy Conversion and Utilization Institute (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China;
4. Disaster Prevention and Reduction Center of State Grid Hunan Electric Power Company (State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid), Changsha 410129, China)

Abstract: Following a wildfire disaster, quickly grasping the disaster situation and reasonably dispatching emergency resources can help shorten the restoration time of the distribution system and achieve the rapid restoration of critical loads. To expedite the post-disaster restoration process of the distribution system, an integrated satellite-terrestrial network (ISTN) architecture based on low earth orbit (LEO) satellite internet is introduced to build a three-layer restoration framework, encompassing information perception, fire response, and load restoration. With the objective of minimizing load loss, perception time and satellite terminal deployment cost, a cyber-physical collaborative restoration model of the distribution system under wildfire disasters is proposed. Firstly, a multi-source coupled fire detection model is constructed to evaluate fire levels and propagation trends in the disaster area. Secondly, the aerial and ground firefighting teams are coordinated to establish a multi-constraint firefighting dispatching model for optimizing the fire extinguishing paths and time. Then, a load restoration model is proposed that considers node state knowability, power topology accessibility, and LEO satellite communication terminal deployment strategies. Finally, a linearized two-stage optimization method is used to improve the solving efficiency. Simulations are conducted on the IEEE 33-bus system and a 10-bus sensing network, and the results validate the effectiveness and superiority of the proposed method in terms of shortening restoration time, enhancing total restoration capacity, and optimizing resource allocation.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2024YFB2409100), National Natural Science Foundation of China (No. 52477091), National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 52125705), and Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (No. 2024RC1038).

Key words: wildfire disaster; emergency resource; load restoration; integrated satellite-terrestrial network (ISTN); resilience; cyber-physical system; distribution system



中国知网　https://www.cnki.net

附录A

A1 配电节点负荷权重指数

基于配电节点影响指标$\boldsymbol{I}=\{I_{i,1},I_{i,2},I_{i,3},I_{i,4},I_{i,5}\}$,建立配电节点负荷权重指数$R_{i,2}$。

$$R_{i,2}=\sum_{v=1}^{5}\zeta_{i,v}I_{i,v} \tag{A1}$$

式中:$I_{i,1}$为节点负荷等级,由节点承担负载容量确定;$I_{i,2}$为关键用户接入数;$I_{i,3}$为节点中心性,取决于节点在配电系统拓扑中的重要性;$I_{i,4}$为下游用户影响系数;$I_{i,5}$为节点旁路系数,根据节点失效后是否存在旁路路径确定;$\zeta_{i,v}$为配电节点i指标v的权重系数。

A2 配电系统恢复路径及时间约束

与灭火队伍相似,配电系统恢复从黑启动电源所在节点开始,通过控制远动开关闭合逐步恢复各个待恢复节点。恢复路径约束具体如下:

$$\sum_{j\in N^{\mathrm{P}}}^{n^{\mathrm{P}}}x_{ij}=\begin{cases}1 & \forall i\in N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}}\\ 0 & \forall i\notin N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}}\end{cases} i\neq j \tag{A2}$$

$$x_{ij}^{\mathrm{P}}+x_{ji}^{\mathrm{P}}\leqslant 1\quad \forall(i,j)\in L^{\mathrm{P}},i\neq j \tag{A3}$$

$$\sum_{i=1}^{n^{\mathrm{P}}}x_{ij}^{\mathrm{P}}\leqslant 1\quad \forall j\in N^{\mathrm{P}} \tag{A4}$$

$$\sum_{j=1}^{n^{\mathrm{P}}}x_{ij}^{\mathrm{P}}\leqslant\sum_{h=1}^{n^{\mathrm{P}}}x_{hi}^{\mathrm{P}}\leqslant n^{\mathrm{P}}\quad \forall i\in N^{\mathrm{P}} \tag{A5}$$

$$x_{ij}^{\mathrm{P}}\leqslant A_{ij}^{\mathrm{P}}\quad \forall i,j\in N^{\mathrm{P}} \tag{A6}$$

式中:x_{ij}^{P}为配电系统恢复路径的0-1变量,$x_{ij}^{\mathrm{P}}=1$为恢复从节点i移动至节点j;L^{P}为配电输电线路集合;$N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}}$为配电系统中的黑启动电源节点集合;$\boldsymbol{A}^{\mathrm{P}}=[A_{ij}^{\mathrm{P}}]^{|n^{\mathrm{P}}|\times|n^{\mathrm{P}}|}$为配电节点连接矩阵,$A_{ij}^{\mathrm{P}}=1$为存在$i$和$j$间的可恢复路径。

在配电系统恢复路径的基础上,可进一步通过如下约束描述配电系统各个节点的恢复时间:

$$t_i^{\mathrm{P}}=t_i^{\mathrm{P,F}}+T_{ii}^{\mathrm{P}}\quad \forall i\in N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}} \tag{A7}$$

$$t_j^{\mathrm{P}}\geqslant t_{ij}^{\mathrm{R}}+T_{ij}^{\mathrm{P}}-M(1-x_{ij}^{\mathrm{P}})\quad \forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall j\notin N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}} \tag{A8}$$

$$t_j^{\mathrm{P}}\leqslant t_{ij}^{\mathrm{R}}+T_{ij}^{\mathrm{P}}+M(1-x_{ij}^{\mathrm{P}})\quad \forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall j\notin N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}} \tag{A9}$$

$$t_{ij}^{\mathrm{R}}=\max[t_i^{\mathrm{P}},\min(t_j^{\mathrm{P,F}},t_j^{\mathrm{S,c}})]\quad \forall i,j\in N^{\mathrm{P}} \tag{A10}$$

$$t_j^{\mathrm{P}}\geqslant(T+1)-M\sum_{i=1}^{n^{\mathrm{P}}}x_{ij}^{\mathrm{P}}\quad \forall j\notin N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}} \tag{A11}$$

$$t_j^{\mathrm{P}}\leqslant(T+1)+M\sum_{i=1}^{n^{\mathrm{P}}}x_{ij}^{\mathrm{P}}\quad \forall j\notin N_{\mathrm{B}}^{\mathrm{P}} \tag{A12}$$

式中:T_{ij}^{P}为节点i与j之间的开关动作所需时间;T_{ii}^{P}为节点i处的黑启动电源自启动时间;t_{ij}^{R}为配电节点i已恢复供电,且恢复路径的目标节点j完成的时间;$t_i^{\mathrm{P,F}}$为配电节点i火情消除的时间;$t_i^{\mathrm{S,a}}$为配电节点i卫星通信接入时间。

式(A7)为在黑启动电源所在节点状态已知后,黑启动电源自启动并为其所在节点供电;式(A8)—式(A10)为若节点i、j间存在恢复路径且i恢复供电,j状态已知,则在开关动作时间后,节点j恢复供电,否则该约束不起作用;式(A11)和式(A12)为若配电系统恢复路径不通过节点j,则其恢复供电的时间为$T+1$。

与感知网络类似,建立配电节点恢复时间约束,具体如下:

$$\sum_{t=1}^{T+1}u_{i,t}^{\mathrm{P}}\leqslant M\sum_{h=1}^{n^{\mathrm{P}}}x_{hi}^{\mathrm{P}}\quad \forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A13}$$

$$T+1-\sum_{t=1}^{T+1}u_{i,t}^{\mathrm{P}}=t_i^{\mathrm{P}}\quad \forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A14}$$

$$u_{i,t-1}^{\mathrm{P}}\leqslant u_{i,t}^{\mathrm{P}}\quad \forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall t\geqslant 2 \tag{A15}$$

中国知网 https://www.cnki.net

式(A13)为配电节点i恢复供电的前提是存在通过该节点的恢复路径;式(A14)为配电节点i在其恢复完成的时间点后皆恢复供电;式(A15)约束已恢复供电的节点不再断电。

A3 配电系统潮流约束

$$V^{\min}u_{i,t}^{\mathrm{P}}\leqslant V_{i,t}\leqslant V^{\max}u_{i,t}^{\mathrm{P}}\quad \forall i\in N^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A16}$$

$$V_{i,t}=V_0u_{i,t}^{\mathrm{P}}\quad \forall i\in N_{\mathrm{G}}^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A17}$$

$$v_{k,t}^{\mathrm{P}}=u_{i,t}^{\mathrm{P}}u_{j,t}^{\mathrm{P}}(x_{ij}^{\mathrm{P}}+x_{ji}^{\mathrm{P}})\quad \forall k=(i,j)\in L^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A18}$$

$$0\leqslant|P_{k,t}|\leqslant P_k^{\max}v_{k,t}^{\mathrm{P}}\quad \forall k\in L^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A19}$$

$$0\leqslant|Q_{k,t}|\leqslant Q_k^{\max}v_{k,t}^{\mathrm{P}}\quad \forall k\in L^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A20}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{G}}=P_{i,t}^{\mathrm{L}}+\sum_{k\in L^{\mathrm{P}}}(P_{k,t}d_{ij}^{\mathrm{P,k}})\quad \forall k=(i,j)\in L^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A21}$$

$$Q_{i,t}^{\mathrm{G}}=Q_{i,t}^{\mathrm{L}}+\sum_{k\in L^{\mathrm{P}}}(Q_{k,t}d_{ij}^{\mathrm{P,k}})\quad \forall k=(i,j)\in L^{\mathrm{P}},\forall t \tag{A22}$$

$$\begin{cases}(V_{i,t}-V_{j,t})V_0\leqslant(P_{k,t}R_{ij}+Q_{k,t}X_{ij})+M(1-v_{k,t}^{\mathrm{P}})\\(V_{i,t}-V_{j,t})V_0\geqslant(P_{k,t}R_{ij}+Q_{k,t}X_{ij})-M(1-v_{k,t}^{\mathrm{P}})\\\forall k=(i,j)\in L^{\mathrm{P}},\forall t\end{cases} \tag{A23}$$

式中:$v_{k,t}^{\mathrm{P}}$为为配电系统线路k在时刻t的恢复状态的0-1变量,线路恢复时$v_{k,t}^{\mathrm{P}}=1$,否则,线路未恢复;$P_k^{\max}$和$Q_k^{\max}$分别为线路k的最大有功和无功容量;$d_{ij}^{\mathrm{P},k}$为线路k和节点i和节点j的连接关系变量,若线路k从节点i连接至节点j,则$d_{ij}^{\mathrm{P},k}=1$,否则$d_{ij}^{\mathrm{P},k}=0$。

式(A16)约束了恢复节点的电压幅值;式(A17)约束黑启动电源的输出电压始终保持标准值;式(A18)为若线路k连接的两节点在时刻t均已恢复,且线路在修复路径上,则线路在时刻t恢复;式(A19)和式(A20)约束了已恢复路径上的有功、无功容量;式(A21)和式(A22)为各节点的功率平衡约束;式(A23)为配电节点电压幅值关系。

A4 约束线性化

A4.1 无人机模型的线性化

1)无人机恢复时间约束的线性化。式(11)和式(14)通过大M法分别线性化为:

$$\begin{cases}t_a^{\mathrm{U,c}}\geqslant t_a^{\mathrm{U,g}}+T_{ab}^{\mathrm{U}}-M(1-x_{ab}^{\mathrm{U}})\\t_a^{\mathrm{U,c}}\leqslant t_a^{\mathrm{U,g}}+T_{ab}^{\mathrm{U}}+M(1-x_{ab}^{\mathrm{U}})\end{cases}\quad \forall a\in N^{\mathrm{F}},b\in M^{\mathrm{F}} \tag{A24}$$

$$\begin{cases}T_b^{\mathrm{U,c}}\geqslant T+1-M\sum\limits_{a=1,a\neq b}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}}\\T_b^{\mathrm{U,c}}\leqslant T+1+M\sum\limits_{a=1,a\neq b}^{n^{\mathrm{F}}}x_{ab}^{\mathrm{U}}\end{cases}\quad j\in M^{\mathrm{F}} \tag{A25}$$

2)无人机电池能量约束的线性化。式(18)通过大M法线性化为:

$$\begin{cases}E_b^{\mathrm{U,c}}\geqslant E_a^{\mathrm{U,c}}+p^{\mathrm{U}}(T_{ab}^{\mathrm{F}}+t_a^{\mathrm{U}})-M(1-x_{ab}^{\mathrm{F}})\\E_b^{\mathrm{U,c}}\leqslant E_a^{\mathrm{U,c}}+p^{\mathrm{U}}(T_{ab}^{\mathrm{F}}+t_a^{\mathrm{U}})+M(1-x_{ab}^{\mathrm{F}})\end{cases}\quad \forall a\in U^{\mathrm{F}},b\in M^{\mathrm{F}} \tag{A26}$$

A4.2 交换机供能约束的线性化

引入1个0-1辅助变量δ_{fp}及采用大M法对式(22)进行线性化处理,具体如下:

$$\begin{cases}D_{i,t}^{\mathrm{F,P}}-D_{j,t}^{\mathrm{F,P}}\leqslant M(1-\delta_{\mathrm{fp}})\\D_{j,t}^{\mathrm{F,P}}-D_{i,t}^{\mathrm{F,P}}\leqslant M(1-\delta_{\mathrm{fp}})\end{cases}\quad i,j\in N_a^{\mathrm{F,P}},\forall t \tag{A27}$$

相似地,采用引入0-1辅助变量δ_{pi}及大M法对式(26)进行线性化处理,具体如下:

$$\begin{aligned}&P_{i,t}^{\mathrm{L}}-\lambda P_i^{\mathrm{L,m}}-M(1-\delta_{\mathrm{pi}})\leqslant 0\\&P_{i,t}^{\mathrm{L}}-\lambda P_i^{\mathrm{L,m}}+M(1-\delta_{\mathrm{pi}})\geqslant 0\end{aligned} \tag{A28}$$

A4.3 卫星通信流量约束的线性化

卫星通信流量约束式(41)可线性为:

中国知网 https://www.cnki.net

$$\begin{cases}\sum_{t=1}^{T} u_{i,t}^{\mathrm{S}} = t_i^{\mathrm{S,c}} - t_i^{\mathrm{S,g}} + 1 \\ tu_{i,t}^{\mathrm{S}} - M(1-u_{i,t}^{\mathrm{S}}) \leqslant t_i^{\mathrm{S,g}} \leqslant tu_{i,t}^{\mathrm{S}} + M(1-u_{i,t}^{\mathrm{S}})\end{cases} \quad \forall i \in N^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{A29}$$

A4.4 配电系统恢复模型的线性化

1）配电节点恢复时间约束：非线性约束为式（A10），设辅助变量 $t_{ij,1} = \min(t_j^{\mathrm{P,F}}, t_j^{\mathrm{S,c}})$，$t_{ij,2} = \max(t_i^{\mathrm{P}}, t_{ij,1})$，引入0-1辅助变量 $\delta_{ij,1}$ 和 $\delta_{ij,2}$。

线性化min函数为式(A30)，具体如下：

$$\begin{cases} t_{ij,1} \leqslant t_j^{\mathrm{P,F}} \\ t_{ij,1} \leqslant t_j^{\mathrm{S,c}} \\ t_{ij,1} \geqslant t_j^{\mathrm{P,F}} - M(1-\delta_{ij,1}) \\ t_{ij,1} \geqslant t_j^{\mathrm{S,c}} - M\delta_{ij,1} \end{cases} \tag{A30}$$

线性化max函数可表示为式(A31)，具体如下：

$$\begin{cases} t_{ij,2} \geqslant t_i^{\mathrm{P}} \\ t_{ij,2} \geqslant t_{ij,1} \\ t_{ij,2} \leqslant t_i^{\mathrm{P}} + M(1-\delta_{ij,2}) \\ t_{ij,2} \leqslant t_{ij,1} + M\delta_{ij,2} \end{cases} \tag{A31}$$

2)配电系统潮流状态约束：非线性约束为式(A18)，式中的 $v_{k,t}^{\mathrm{P}}, u_{i,t}^{\mathrm{P}}, x_{ij}^{\mathrm{P}}$ 皆为0-1变量，通过引入3个辅助变量 $w_{ij,t,1}, w_{ij,t,2}, w_{ij,3}, \in\{0,1\}$ 并结合大M法进行线性化。

引入辅助变量 $w_{ij,t,1} = u_{i,t}^{\mathrm{P}} u_{j,t}^{\mathrm{P}}$，得到：

$$v_{k,t}^{\mathrm{P}} = w_{ij,t,1}(x_{ij}^{\mathrm{P}} + x_{ji}^{\mathrm{P}}) \quad \forall k=(i,j) \in L^{\mathrm{P}}, \forall t \tag{A32}$$

由于 $u_{i,t}^{\mathrm{P}} u_{j,t}^{\mathrm{P}} \in \{0,1\}$，使用以下线性约束为：

$$\begin{cases} w_{ij,t,1} \leqslant u_{i,t}^{P} \\ w_{ij,t,1} \leqslant u_{j,t}^{P} \\ w_{ij,t,1} \geqslant u_{i,t}^{P} + u_{j,t}^{P} - 1 \end{cases} \tag{A33}$$

由于 $x_{ij}^{\mathrm{P}} + x_{ji}^{\mathrm{P}} \in \{0,1,2\}$，引入2个新辅助变量：$w_{ij,t,2} = w_{ij,t,1} x_{ij}^{P}, w_{ij,t,3} = w_{ij,t,1} x_{ji}^{P}$。即得到：$v_{k,t}^{\mathrm{P}} = w_{ij,t,2} + w_{ij,t,3}$。对于 $w_{ij,t,2} = w_{ij,t,1} x_{ij}^{P}$，同式(A33)线性化为：

$$\begin{cases} w_{ij,t,2} \leqslant w_{ij,t,1} \\ w_{ij,t,2} \leqslant x_{ij}^{P} \\ w_{ij,t,2} \geqslant w_{ij,t,1} + x_{ij}^{P} - 1 \end{cases} \tag{A34}$$

同理，对 $w_{ij,t,3}$ 也加入相同结构约束。综上，将式(A18)线性化表示为：

$$\begin{cases} w_{ij,t,1} \leqslant u_{i,t}^{P} \\ w_{ij,t,1} \leqslant u_{j,t}^{P} \\ w_{ij,t,1} \geqslant u_{i,t}^{P} + u_{j,t}^{P} - 1 \\ w_{ij,t,2} \leqslant w_{ij,t,1} \\ w_{ij,t,2} \leqslant x_{ij}^{P} \\ w_{ij,t,2} \geqslant w_{ij,t,1} + x_{ij}^{P} - 1 \\ w_{ij,t,3} \leqslant w_{ij,t,1} \\ w_{ij,t,3} \leqslant x_{ji}^{P} \\ w_{ij,t,3} \geqslant w_{ij,t,1} + x_{ji}^{P} - 1 \\ v_{k,t}^{\mathrm{P}} = w_{ij,t,2} + w_{ij,t,3} \end{cases} \tag{A35}$$

中国知网 https://www.cnki.net

附录 B

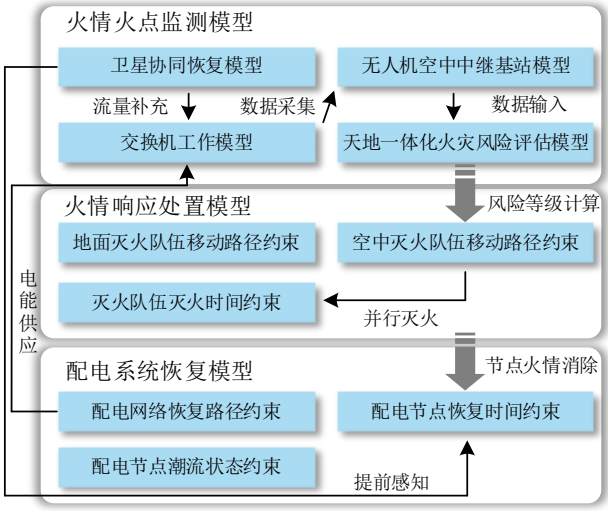


图 B1　模型中各约束耦合关系

Fig. B1　Constraint coupling relationships of model

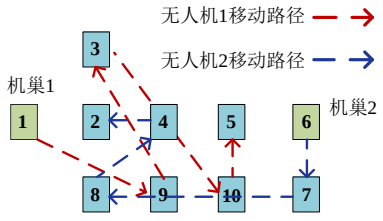


图 B2　无人机移动路径

Fig. B2　Unmanned aerial vehicle (UAV) movement path

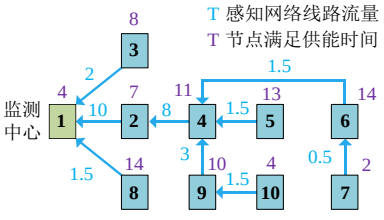


图 B3　感知网络恢复完成时各线路流量及满足供能时间

Fig. B3　Line flow and supply time after sensing network restoration

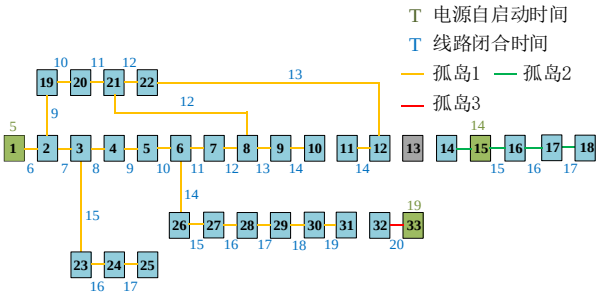


图 B4　未部署卫星终端配电系统孤岛划分及线路闭合时间

Fig. B4　Islanding division results and line reconnection time of PDN without satellite communication terminals

中国知网　https://www.cnki.net

附录C

监测中心位于感知网络节点1,9个交换机分别位于感知网络节点2－节点10,每台交换机对应多个部署于配电节点的传感器。配电系统中节点1为平衡节点,节点15和节点33均接入光伏站及风电场,光伏站有功出力范围为[0,0.8],无功出力范围为[－0.9,0.9],风电场有功出力范围为[0,0.5],无功出力范围为[－0.4, 0.4]。节点1、节点15和节点33在配电系统恢复过程中皆接入黑启动电源。配电系统各节点处传感装置产生的数据流量设为f_i^{C}=0.5 MB/s;地面有线通信线路的流量容量设为$f_g^{\max}$=10 MB/s,恢复交换机电能供给所需的负荷恢复比例λ=0.4。无人机感知单位时间成本c^{U}=5 000元,感知时间成本－负荷转化系数γ=0.01(MW•min)/元。

本文假设:1)火灾发生后,地面感知网络中有线通信线路全部断开,配电系统线路远动开关全部跳闸无法闭合,配电信息物理系统从全黑状态开始恢复;2)交换机仍储备有足够辅助无人机完成信息传输的能量;3)部署了卫星通信终端的配电节点同时配备有自动化消防设施,可以在火灾发生时扑灭配电节点火情;4)黑启动电源节点同时仅接入一种电源。本文对所使用的数据来源说明如下:1)配点节点火险指数计算数据:山火蔓延方向配电节点方向夹角及路径的平均坡度基于数字高程模型(DEM)进行提取;2)配点节点负荷权重指数计算数据:国家重点研发计划项目提供区域样本数据,包括:可燃物更正系数、风速、火点到配电节点之间的距离、节点负荷等级、关键用户接入数、节点中心性、下游用户影响系数及节点旁路系数。

附录D

表D1　感知网络节点参数

Table D1　Parameters of sensing network node

节点编号	节点x轴坐标/km	节点y轴坐标/km	节点风速/(m/s)	节点植被类型Ks[7]
1	8	7.5	13.5	2
2	7.5	4.8	16	1.6
3	2	7	15.2	2
4	8.8	3	15.3	1.8
5	4.5	9	14	2
6	6	6	15.3	2
7	3.2	1.5	8	0.8
8	9.5	1	12.4	2
9	3	4	15	2
10	1	8.5	13	2

表D2　感知网络节点火灾风险系数

Table D2　Fire risk coefficient of sensing network nodes

节点编号	火灾风险系数	节点编号	火灾风险系数
1	0.138 2	6	0.174 6
2	0.198 0	7	0.401 1
3	0.202 6	8	0.118 6
4	0.187 3	9	0.129 8
5	0.159 4	10	0.145 4

中国知网　https://www.cnki.net

表 D3　配电节点负荷权重系数
Table D3　Load weight coefficients of PDN

节点编号	负荷权重系数	节点编号	负荷权重系数
1	0.415 7	18	0.098 3
2	0.317 7	19	0.287 5
3	0.437 6	20	0.345 0
4	0.212 1	21	0.700 7
5	0.157 1	22	0.412 3
6	0.513 4	23	0.192 5
7	0.553 6	24	0.694 7
8	0.343 8	25	0.673 8
9	0.290 4	26	0.179 9
10	0.278 2	27	0.121 3
11	0.410 3	28	0.241 0
12	0.594 8	29	0.539 1
13	0.256 0	30	0.883 6
14	0.229 5	31	0.269 5
15	0.128 3	32	0.438 5
16	0.107 8	33	0.106 2
17	0.144 5		

表 D4　卫星通信终端部署结果、接入时间及切除时间
Table D4　Deployment result, access and withdrawal time of satellite communication terminals

部署节点	接入时间	切除时间
31	3	15
32	2	26
33	1	19

中国知网　https://www.cnki.net