



## 基于电力物联网边缘计算实现脱网应急通信的方法

伏冬红<sup>1</sup>, 刘丹<sup>1</sup>, 施贵军<sup>1</sup>, 王安鑫<sup>1</sup>, 范春雪<sup>1</sup>, 王海军<sup>2</sup>, 张翼英<sup>3</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司营口供电公司, 辽宁 营口 115002;

2. 上海欣影电力科技股份有限公司, 上海 200436;

3. 天津科技大学计算机科学与信息工程学院, 天津 300222)

**摘 要:** 针对配用电脱网应急通信需求, 设计了新型多模式节点, 具备专网与公网技术结合的多模式通信能力, 可以实现电力专网、无线自组网及无线公网多模切换。通过数据集中上传至多模终端, 多模终端通过模式快速切换, 借助公网资源实现网络的快速恢复和数据的持续传输, 实现脱网应急通信。同时, 提出了一种基于畅通度的智能路由算法, 定义边缘网络通信三原则, 并通过边缘计算方法, 实现对畅通度的计算与更新, 保障边缘网络在脱网状态下的智能、高效、可靠运行。

**关键词:** 电力物联网; 边缘计算; 脱网应急通信; 畅通度

**中图分类号:** TN393.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2018012

## Off-line emergency communication method of power internet of things based on edge computing

FU Donghong<sup>1</sup>, LIU Dan<sup>1</sup>, SHI Guijun<sup>1</sup>, WANG Anxin<sup>1</sup>,

FAN Chunxue<sup>1</sup>, WANG Haijun<sup>2</sup>, ZHANG Yiyi<sup>3</sup>

1. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Yingkou Power Supply Company, Yingkou 115002, China

2. Shanghai Xinying Electric Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200436, China

3. Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China

**Abstract:** A new multi-mode node was designed for the emergency communication with the demand of electricity. The node had the multi-mode communication capability of the private network and the public network technology, which could switch smoothly in three modes: the power private network, the wireless Ad Hoc network and the wireless public network. Data were automatically uploaded to the multi-mode terminal, multi-mode terminal through the mode of rapid switching, with the public network resources to achieve rapid network recovery and continuous transmission of data to achieve off-line emergency communications. Meanwhile, an intelligent routing algorithm based on smoothness was proposed, and the three principles of edge network communication were defined. Through the edge calculation method, the calculation and updating of the smoothness were realized to ensure the intelligent, efficient and reliable operation of the edge network in the offline state.

**Key words:** power internet of things, edge computing, off-line emergency communication, smoothness



## 1 引言

随着电力工控系统与物联网等技术的深度融合,智能电网尤其是智能配用电环节,部署大量智能终端、感知设备等构成边缘感知网络(以下简称边缘网络),形成信息空间虚拟网络和物理空间实体网络紧密耦合的协同互动的二元异构复合的电力物联网<sup>[1,2]</sup>。边缘网络通过对象感知或控制以及各种无线通信技术,实现信息采集、电力操作控制和分析决策支撑以及智能电网智能化、互动化和信息化,为智能配用电提供重要的应用和功能支撑<sup>[3,4]</sup>。但是,现有无线通信系统可靠性以及应对灾难能力不足,大都基于基站的通信方式,其可靠性完全依赖于基站,一旦基站发生故障,基站覆盖区域的通信终端将无法正常工作,造成通信网络的局部中断,进而影响配用电系统的安全稳定运行。当发生紧急情况,如地震、雷电等致使基站受损或瘫痪,导致网络通信不畅或者通断<sup>[5,6]</sup>。其中,基站故障主要分为如下两类情况。

- 骨干网通信不畅,一体化基站无法通过路由器连接到业务主站。在这种状况下,可以考虑通过多个基站进行横联组网模式,如图1所示。当基站与主站之间的通信发生故障中断时,基站通过与周围基站横连组网,实现终端业务通过其他基站中继接入主站。

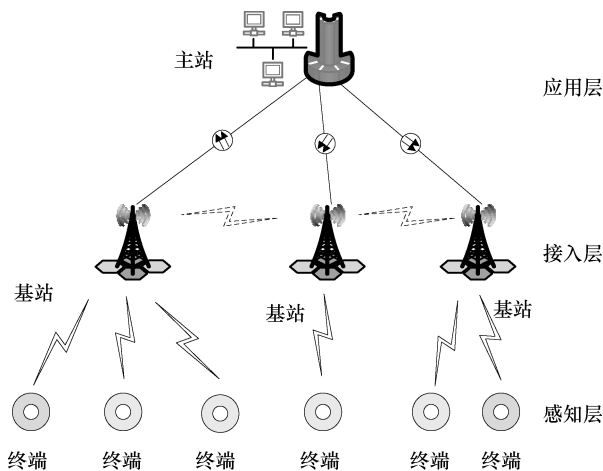


图1 配用电通信接入网络结构

- 基站功能异常情况下,骨干节点重新与最近的可正常工作基站连接,进行数据上行传输。当基站失效时,基站所辖终端通过周围基站所辖终端接入周围基站,实现终端业务通过其他终端(或其他基站)中继接入主站;但是当周边无可用基站时,就容易造成边缘网络信息丢失,发生脱网事件。

因此,设计新的网络架构、采用新的方法应急通信脱网情况,实现故障及灾害条件下的脱网运行,对于保障边缘网络信息可靠传输、功能正常运转,提升系统抗故障能力具有重大意义。

针对上述问题,设计了新型多模式节点,采用边缘计算方法,实现电力专网、无线自组网及无线公网多模切换,此节点可作为普通节点或骨干节点。作为普通节点,可通过无线公网进行信号传输。作为骨干节点,可承担主站功能,汇聚并处理普通(成员)节点数据,切换到无线公网模块进行数据集中上行传输,此时终端间具备无基站时的直接通信能力。提出了一种基于畅通度的路由算法,定义边缘网络通信三原则,通过边缘计算方法,实现对畅通度的计算与更新,完成本地业务的边缘化处理,保证局部业务自治。而且建立智能路由,实现多模节点对应公网连接,保障自组织边缘网络的脱网运行。

## 2 边缘计算与脱网应急研究

### 2.1 边缘计算

边缘计算是指在边缘网络中针对海量的边缘数据在边缘空间(边缘空间是指数据源(终端节点)到数据中心任意空间<sup>[4]</sup>)处理,从而减少对数据中心(云中心)依赖,实现边缘网络有限自治,降低脱网威胁。同时,借助无线节点自组织网络特性,动态重构网络,利用边缘计算实现对节点、路由、带宽等网络关键参数优化,实现智能路由。边缘计算模型,可以有效解决部分脱网

运行难题,即从本地功能实现上保障有效性。电力物联网边缘计算模型如图2所示。

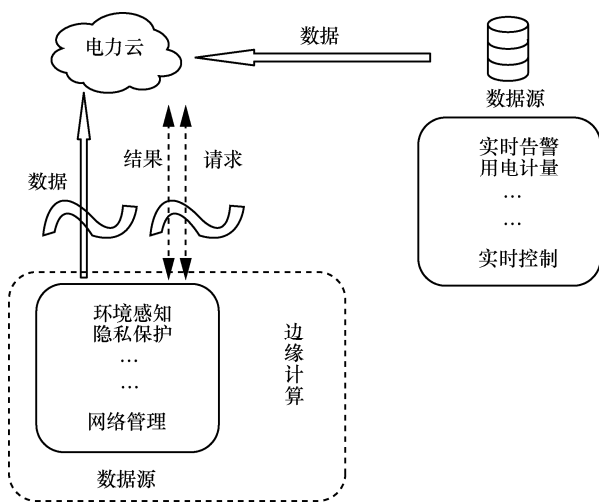


图2 电力物联网边缘计算模型

## 2.2 脱网应急通信技术

对于配用电通信,通常有3种脱网应急通信方式<sup>[6-8]</sup>。

### 2.2.1 普通直通方式

普通直通方式是在终端之间建立直接通信通道,完全没有其他设备参与。基站由于故障等原因不能支撑网络工作,因此需要依照独立通信标准,在终端之间建立空中接口并完成直通。该方式接口协议将空中接口分为3层,如图3所示。

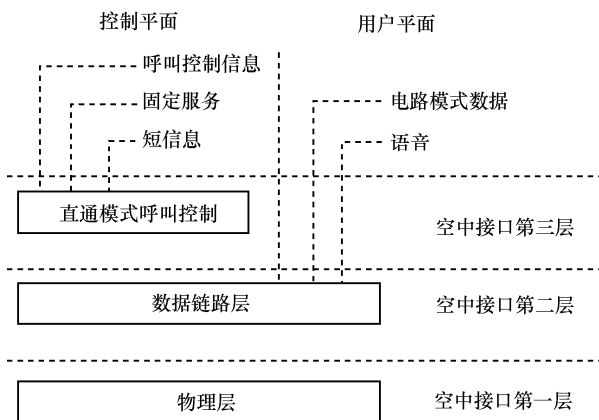


图3 直通模式空中接口协议

该方式适合节点较少且普通节点功能性比较强的网络采用,由于没有基站,单个节点直接通过空

种接口进行通信;不适合规模大、普通节点的网络。

### 2.2.2 网络参与的直通方式

与第一种方式相比,网络参与的直通方式需要更多资源协同。主要是在集群终端建立直通时有网络参与,直通建立后网络退出。该方式用于移动台向网络发起直通方式请求,然后由网络向主叫移动用户和被叫移动用户分配无线资源和端到端的加密密钥,在具有直通功能移动台之间提供点对点、点对多点的通信。

### 2.2.3 多跳中继直通方式

多跳中继直通模式是基于大规模多节点接入状态,以普通直通模式为基础,通过中间节点中继来实现多跳通信,保障大范围通信覆盖的一种直通方式,如图4所示。多跳中继直通模式主要在路由规划及汇聚点之间选择。在多跳过程中,路由通过中间节点作为中继完成,中继选择有两种方式:一种是利用单独的中继设备,另一种是给每个集群终端都增加中继功能,本文利用集群终端进行中继转接。

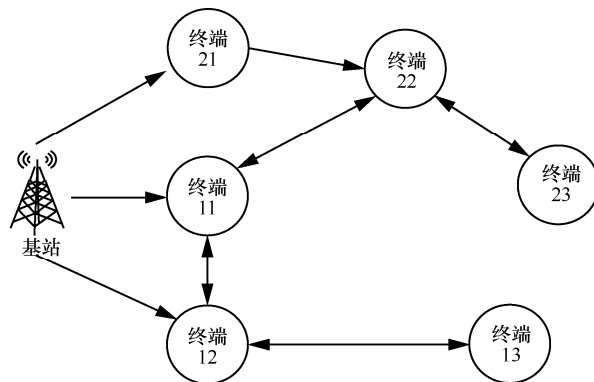


图4 多跳中继直通模式

由图4可知,当终端节点11发起通信请求时,如果被叫终端距离较远(如终端节点23),无法接收呼叫信号,具有无线自组织功能的其他终端在收到呼叫信号后,可以把该信号转发给邻近的终端,以使呼叫连接得以建立。

3种脱网通信方式,没有考虑当前电力物联网网络规模比较大、部分节点不具有直通功能的情



况。通过深入分析电力业务差异化需求,依据边缘网络特征,提出边缘网络多跳中继直接通信方法,保障应急情况下无核心网络的自组织通信;同时,设计了终端模块多模通信机制,实现无基站模式下无线专网与公网的融合通信,解决脱网通信运行问题。

### 3 系统模型设计

#### 3.1 多模终端节点模块设计

依据电力业务功能需求及通信特性,设计了一款多模终端节点,包括配电通信终端、配电通信模块、脱网运行终端、无线中继终端等多种形态,如图5所示<sup>[9,10]</sup>。终端在性能上要求可支持配用电多形态小型化工作场景,用户接口、体积、功率需遵循配用电业务标准规定并满足配用电业务需求。其中,通信模块完成对空口信号的收发通信,接收接入子系统发送的无线信号,进行解调译码等基带处理,并根据协议对接收数据进行处理;同时将需要发往终端的数据进行编码调制,并通过天线子系统发射。通信模块除负责完成无线通信功能外,还包括USIM卡模块和加解密模块,这两个模块用以保证系统对终端的鉴权和加密。应用模块为用户提供各种有线或无线接口以及支持不同业务需求的多种接口。

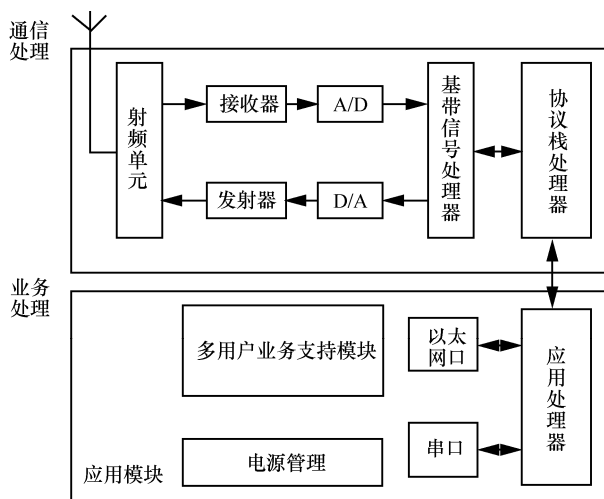


图5 多模终端模块

在网络组建过程中,该节点常规情况下采用专网通信模块进行通信,公网通信模块作为备用模块在应急情形下使用。应急情况下基站发生故障时,单模无线终端可通过分布式路由互联机制重新进行路径选择和切换,数据集中上传至多模终端,多模终端通过模式快速切换,借助公网资源实现网络的快速恢复和数据的持续传输。

#### 3.2 网络架构设计

当基站发生故障时,为了保障通信可持续进行,应利用多模通信机制、公网通信技术实现数据不间断传输,提高网络的抗毁能力,如图6所示。在网络组建过程中,部分无线终端具备专网与公网技术结合的多模式通信能力,常规情况下采用专网通信模块进行通信,公网通信模块作为备用模块在应急情形下使用。应急情况下基站发生故障时,单模无线终端可通过分布式路由互联机制重新进行路径选择和切换,数据集中上传至多模终端,多模终端通过模式快速切换,借助公网资源实现网络的快速恢复和数据的持续传输。同时,为保障公网接入系统中数据的安全性和完整性,可以通过信息加密技术和身份认证技术实现。其中,信息加密可以采用IPSec VPN和SSL VPN等技术实现;身份认证可以采用PKI技术实现。

边缘网络采用分层式架构与对等式架构结合的方式进行混合组网,多模终端作为簇头,承担骨干节点作用,节点分为簇头节点与普通成员节点两大类,如图7所示。根据网络实际应用场景,簇节点可以有两种实现方法,即由固定设置基础设施节点或动态选取功能较强的普通用户节点获得<sup>[11]</sup>。这些簇节点具有较大的存储空间、计算能力或能量储备。

设 $C$ 为簇,CH为簇头。对于任意簇节点 $v_j \in C, v_j \neq CH$ ,称 $v_j$ 为成员节点。CH发出初始建簇消息beacon,当成员节点 $v_j$ 接到beacon消息后,选择加入簇 $C_i$ ,计算TTL,并通过ACK消息

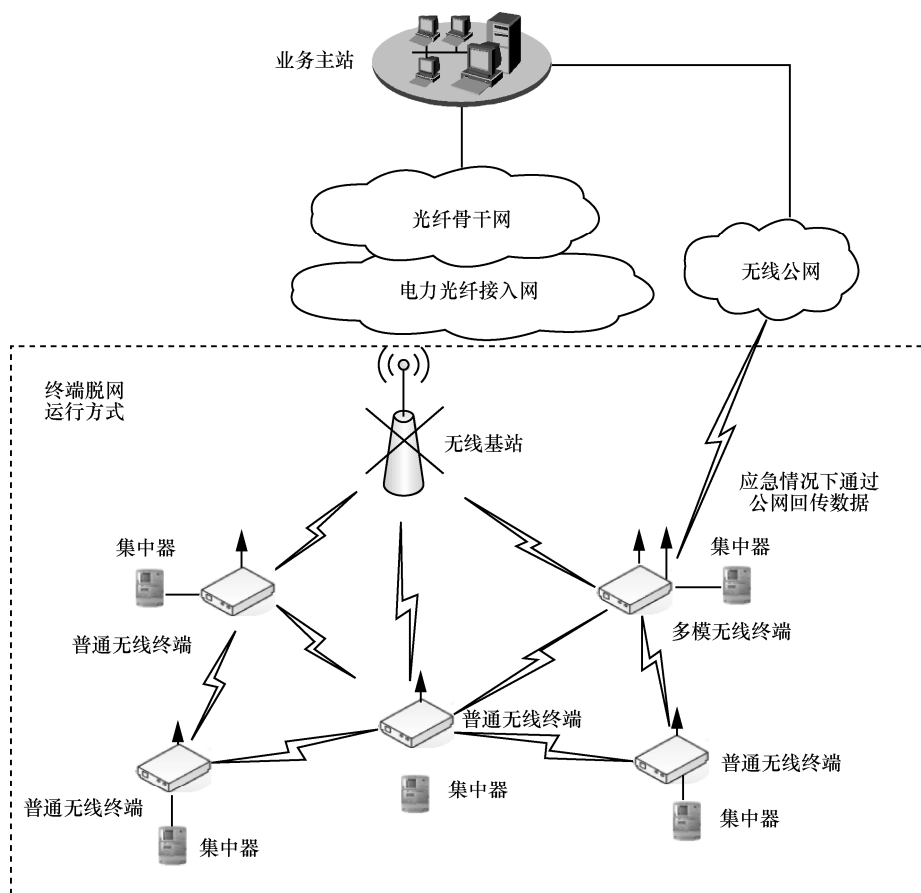


图 6 脱网应急通信架构

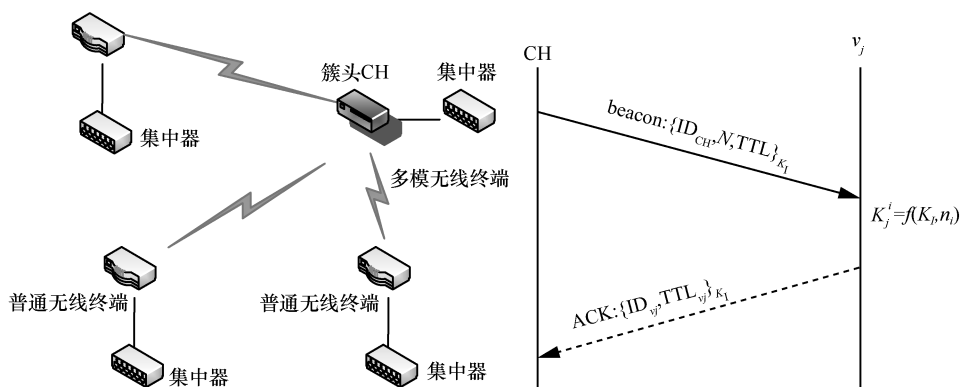


图 7 初始簇产生过程

把  $ID_{v_j}$  和  $TTL_{v_j}$  发送给簇头。从而，簇头获得簇头到该节点的跳数。

簇头节点之间可以形成区域的簇头节点群，即数个簇头节点处于相邻区域，共同为机会网络其他节点提供计算能力、存储空间等资源。

簇头节点的设立位置或选取规则, 可以综合考虑业务流向、节点移动、网络拓扑变化、与其他节点相遇概率、存储资源、剩余能量等因素。普通节点的路由作用相对较为轻松, 为了保障网络具备可重构特性, 通过分布式路由技术使



得普通节点具备多路由的能力，并需具备维护路由状况的能力，但是其仅保存与自身密切相关的少量路径。每一个簇，可以看成是一个本地化的边缘网络，簇头及成员节点都可以根据信息进行判定和处理。

## 4 智能路由算法

路由算法是其中的关键研究技术，如何在跳数尽可能少、时延尽可能低的情况下，选择尽可能可靠的链路是笔者要考虑的问题<sup>[12,13]</sup>。传统路由协议在自组织网络中主要存在以下问题，因此要实现配电网中的路由协议，需要做出一定修改。

- 网络拓扑变化太快，传统路由协议将给网络造成很大的控制负荷。
- 周期性的路由刷新加大了自组织网络中计算节点的能量消耗。
- 复杂的路由信息交换减少了有效系统带宽。

### 4.1 构建路由表

在成簇的边缘网络中，用畅通度定义网络节点的连通性、可靠性和实效性。而路由判定策略决定了网络畅通指数，为了延长网络的生存时间，并保证可靠实时传输，路由判定策略需要保护低能量节点，防止出现“孤岛”<sup>[14,15]</sup>。但是，过度规避优先级低节点会使得传输链路路径变长、频繁链路节点消耗过快、网络生存时间减小<sup>[16]</sup>。因此，根据边缘网络特性，设定网络节点连通性遵守如下3个原则。

- 空间度量原则：中间中继节点在路由表中的位置  $p(N_i)$  越接近目标节点（通常为作为簇头的骨干节点）CH，畅通度越高。
- 权重度量原则：若传输链路径长度相同，权重  $r(N_i)$  越大，畅通度越高（权重为能量、可靠性、QoS 等综合评估）。
- 时间度量原则：若传输链路径长度相同，消

息时延（节点  $N_j$  到  $N_i$ ）越小，畅通度越高。

每个节点维持一个畅通度列表（smoothness table, ST），代表节点间的畅通能力，如式（1）所示：

$$ST = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中，ST 为  $n \times n$  二维矩阵； $S_{ij}$  表示节点  $N_i$  对节点  $N_j$  的畅通度；ST 中的行向量  $S_j = (S_{j1}, S_{j2}, S_{j3}, \cdots, S_{jn})$  表示目标节点  $N_j$  对网络中（相邻）中继节点的畅通度<sup>[17-19]</sup>。同时，根据运行中节点状态动态变化，节点  $N_i$  维护和更新畅通度路由表；当任意节点收到  $N_j$  动态回馈信息后，对 ST 中的相关性高的行向量  $S_j$  数据进行更新。ST 随着网络运行及其状态变化，通过边缘计算方法，实现  $S_{ij}$  动态更新畅通度。

**定义 1**（节点畅通度）设  $\xi(N_i)$  为节点  $N_i$  对节点  $N_j$  在某个路由上的畅通度，令：

$$\xi(N_i, N_j) = \frac{1}{2} \left( e^{-\lambda x \frac{\Delta t}{TTL}} + \gamma(N_i) + (1 - \gamma(N_i)) \times \left( \frac{p(N_i)}{|p(N_i) - p(N_j)|} \right) \right), i \neq j \quad (2)$$

其中， $\rho(x) = e^{-\lambda x}$ ， $0 < x \leq 1$  表示路由时延性奖励函数，该策略具有指数递减性， $\Delta t$  越小，时延性信任奖励越高，取值范围为  $e^{-\lambda} \leq \rho(x) < 1$ ， $\lambda > 0$  为时延性奖励最小值的调节因子，该奖励函数根据网络时延性要求设置调节因子；

$f(y) = r + (1 - r)y^2$ ， $0 < y \leq 1$  为转发节点可靠性奖励函数，策略具有递增性； $\gamma(x)$  为权重函数，能够根据网络特性要求调整  $\gamma(x)$ 。

根据式（1）和式（2），在路由建立过程中，目标节点  $N_j$  经过多个一定数量的路由中间节点，逐步形成畅通度向量表  $ST_j(ST_{j1}, ST_{j2}, ST_{j3}, \cdots, ST_{jn})$ ，建立路由通道及节点消费计量，并不断维护和更新向量表中节点的畅通度。畅通度路由表

(smoothness route table, SRT) 反映节点间畅通关系, 由网络中各节点的行向量组成, 不断通过相邻节点信息沟通并迭代畅通度向量表。如图 8 所示, 当节点  $N_i$  与节点  $N_j$  相遇时, 互相交换各自携带的畅通度向量表, 迭代形成新的畅通路由表。

$$\begin{aligned} \text{SRT}_i &= \begin{bmatrix} \text{ST}_{i1} & \text{ST}_{i2} & \cdots & \text{ST}_{in} \\ \text{ST}_{21} & \text{ST}_{22} & \cdots & \text{ST}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{ST}_{i1} & \text{ST}_{i2} & \cdots & \text{ST}_{in} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \text{ST}_{31} & \text{ST}_{32} & \cdots & \text{ST}_{3n} \\ \text{ST}_{j1} & \text{ST}_{j2} & \cdots & \text{ST}_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{ST}_{j1} & \text{ST}_{j2} & \cdots & \text{ST}_{jn} \end{bmatrix} = \text{SRT}_j \\ &\Downarrow \\ \text{SRT}_i &= \begin{bmatrix} \text{ST}_{i1} & \text{ST}_{i1} & \cdots & \text{ST}_{i1} \\ \text{ST}_{21} & \text{ST}_{21} & \cdots & \text{ST}_{21} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{ST}_{i1} & \text{ST}_{i1} & \cdots & \text{ST}_{i1} \\ \text{ST}_{j1} & \text{ST}_{j1} & \cdots & \text{ST}_{j1} \end{bmatrix} = \text{SRT}_j \end{aligned}$$

图 8 相邻节点畅通度路由表迭代

## 4.2 路由算法

当进行信息通信时, 节点基于消息类型, 进行智能判断<sup>[20,21]</sup>: 对于本地化信息, 不需要通过远距离通信到主站, 可以直接进行本地处理并反馈; 对于需要提交总站 (或簇头) 的消息, 首先遍历畅通路由表, 确定下一跳节点优先级, 根据 ST 获取相关信息, 并更新畅通度。具体路由算法如下。

### (1) 簇头节点算法

```

if cur_node=CH then //cur_node 当前节点;
CH 簇头节点
    更新 CH 畅通路由表;
    if cur_node.msg 为本地信息 then
//cur_node.msg 为节点携带信息
        汇聚信息, 本地化处理;
    else
        处理信息, 切换通信模式, 直通通信 (公网);
    end if
    结束路由;
end if

```

### (2) 中间节点算法

```

计算  $\gamma(\text{cur\_node})$  及  $\zeta(\text{cur\_node})$ ;
temp_node.smoothness= $\zeta(\text{cur\_node})$ ;
//temp_node.smoothness 为畅通度参数
for(i=1; i≤|ST|; i++) do
    //遍历畅通度路由表, 建立最优路径
    if ST[i].smoothness<
temp_node.smoothness then //寻找最优畅通节点
        if not abnormal (ST[i]) then //剔除
恶意 (abnormal) 节点
            temp_node.smoothness=ST[i].smoothness
        end if
        srt_cur_node.update(temp_node.smoothness)
    //更新路由表
end for
next_node=temp_node
return next_node

```

该算法依据节点信息, 遍历当前节点的畅通路由表 ST, 算法时间复杂度最大为  $O(N)$ , 从中选择最优节点, 同时沿着畅通梯度最短的方向传递, 有效提高了消息传递的成功率, 降低了网络总体消耗。同时, 根据畅通度路由表, 可以清查和隔离出恶意畅通度节点, 由于恶意或畅通度低的节点不参与协作, 可以剔除这类节点, 提高了网络的安全性和可靠性。

## 5 结束语

配用电网络脱网, 阻塞了信息传递, 容易造成电力故障, 并影响生产应用。本文设计了新型多模式节点, 采用边缘计算方法, 实现电力专网、无线自组网及无线公网多模切换。同时, 提出了一种基于畅通度的路由算法, 定义边缘网络通信三原则, 并通过边缘计算方法, 实现对畅通度的计算与更新及自组织边缘网络的脱网运行。通过边缘计算, 实现对本地化信息的就地处理、不依赖基站等对主站连通处理, 增加了效率, 并提高



了顽健性。此外,在网络组建过程中,部分无线终端具备专网与公网技术结合的多模式通信能力,常规情况下采用专网通信模块进行通信,公网通信模块作为备用模块在应急情形下使用。在应急情况下基站发生故障时,通过多跳智能路由算法,开启单模无线终端的分布式路由互联机制,重新进行路径选择和切换,通过新型多模节点,实现数据集中上传,借助公网资源实现网络的快速恢复和数据的持续传输,保障脱网运行通信。

### 参考文献:

- [1] 刘建明,李祥珍,张翼英,等. 物联网与智能电网[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.  
LIU J M, LI X Z, ZHANG Y Y, et al. Internet of things and smart grid[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [2] 王继业,孟坤,曹军威,等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.  
WANG J Y, MENG K, CAO J W, et al. Information technology for energy internet: a survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5): 1109-1126
- [3] 林为民,余勇,梁云,等. 支撑全球能源互联网的信息通信技术研究[J]. 智能电网, 2015, 3(12): 1097-1102.  
LIN W M, YU Y, LIANG Y, et al. Research on information and communication technology supporting global energy internet[J]. Smart Grid, 2015, 3(12): 1097-1102.
- [4] 施巍松,孙辉,曹杰,等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.  
SHI W S, SUN H, CAO J, et al. Edge computing: an emerging computing model for the internet of everything era[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.
- [5] 陈望勇. 移动通信基站常见故障处理方法与实践[J]. 江苏科技信息, 2016(32): 58-59.  
CHEN W Y. Trouble shooting methods and practice of mobile communication base station[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2016(32): 58-59.
- [6] 杨辉,王武,王绍星. 实现脱网直通方式通话的方法和数字集群终端: 101527971A[P]. 2009-04-14.  
YANG H, WANG W, WANG S X. To achieve the method of off-net direct mode calls and digital trunking terminal: 101527971A[P]. 2009-04-14.
- [7] 侯民术,赵国锋. 集群移动通信中直通模式的分析与研究[J]. 信息技术, 2008(5): 156-159.  
HOU M S, ZHAO G F. Analysis and research of through mode in cluster mobile communication[J]. Information Technology, 2008(5): 156-159.
- [8] 诸葛斌,邓丽,戴国伟,等. 基于双边市场多归属结构的SDN资源管理机制[J]. 电信科学, 2014, 30(5): 55-64.  
ZHUGE B, DENG L, DAI G W, et al. SDN resource management mechanism based on bilateral market's multi-homed architecture[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(5): 55-64.
- [9] 朱晓光,江华. LTE基站系统的PCI自配置技术研究[J]. 电信科学, 2014, 30(7): 130-134.  
ZHU X G, JIANG H. Research on PCI self-configuration technology of LTE eNode B system[J]. Telecommunications Science, 2014, 30(7): 130-134.
- [10] 杨红欣,齐火箭,徐海滨. 用电信息多模采集终端的研究[J]. 电子世界, 2016(2): 115-119.  
YANG H X, QI H J, XU H B. Electricity information multi-mode acquisition terminal[J]. Electronic World, 2016(2): 115-119.
- [11] 马振福. 无线传感器网络中 LEACH-C 协议簇首选择方案研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.  
MA Z F. LEACH-C protocol cluster first choice scheme in wireless sensor networks[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [12] 张维琪,魏春亚,边根庆. 无线传感器网络连通性研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(11): 108-111.  
ZHANG W Q, WEI C Y, BIAN G Q. Research on wireless sensor network connectivity[J]. Journal of Computer Engineering and Applications, 2016, 52(11): 108-111.
- [13] 宗宇,霍梅梅,郑增威. 智能电网邻域网路由算法研究进展[J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(1): 117-124.  
ZONG Y, HUO M M, ZHENG Z W. Research progress on routing algorithm of smart grid neighborhood network[J]. Computer Applications and Software, 2017, 34(1): 117-124.
- [14] 侯民术,赵国锋. 集群移动通信中直通模式的分析与研究[J]. 信息技术, 2008(5): 156-159.  
HOU M S, ZHAO G F. Analysis and research on direct mode in cluster mobile communication[J]. Information Technology, 2008(5): 156-159.
- [15] 舒坚,郭凯,刘群,等. 机会传感网络连通性参数研究[J]. 计算机学报, 2016, 39(5): 1067-1080.  
SHU J, GUO K, LIU Q, et al. Research on the parameters of opportunity sensing network[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(5): 1067-1080.
- [16] 李峰,司亚利,陈真,等. 基于信任机制的机会网络安全路由决策方法[J]. 软件学报, 2017: 1-15.  
LI F, SI Y L, CHEN Z, et al. Decision making method of opportunistic network security routing based on trust mechanism[J]. Journal of Software, 2017: 1-15.
- [17] 樊自甫,伍春玲,王金红. 基于 SDN 架构的数据中心网络路由算法需求分析[J]. 电信科学, 2015, 31(2): 42-51.  
FAN Z F, WU C L, WANG J H. Requirements analysis of data center network routing algorithm based on SDN architecture[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(2): 42-51.



- [18] 吴少川, 赵震, 高书莹, 等. TD-LTE 脱网下群组组播通信方法: 104378743A[P]. 2015-03-15.

WU S C, ZHAO Z, GAO S Y, et al. TD-LTE off-net group multicast communication method: 104378743A[P]. 2015-03-15.

- [19] 周国亮, 吕凛杰, 王桂兰. 电力大数据全景实时分析关键技术[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 159-168.

ZHOU G L, LV L J, WANG G L. Key technology of power big data for global real-time analysis[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 159-168.

- [20] 王歆平, 王茜, 刘恩慧, 等. 基于 SDN 的按需智能路由系统研究与验证[J]. 电信科学, 2014, 30(4): 8-14.

WANG X P, WANG Q, LIU E H, et al. Research and verification on SDN based on demand smart routing system [J]. Telecommunications Science, 2014, 30(4): 8-14.

- [21] 陆俊, 朱炎平, 徐志强, 等. 面向输电线路监测的无线传感网络可靠路由方法研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 644-650.

LU J, ZHU Y P, XU Z Q, et al. Research on reliable routing of wireless sensor networks for transmission line monitoring[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 644-650.

#### [作者简介]



伏冬红(1975-), 女, 国网辽宁省电力有限公司营口供电公司高级工程师, 主要研究方向为电力通信技术、电力营销、计量工程管理。



刘丹(1974-), 男, 国网辽宁省电力有限公司营口供电公司客户服务中心采集运维管理、高级工程师, 主要研究方向为采集运维管理。



王安鑫(1982-), 男, 国网辽宁省电力有限公司营口供电公司老边供电分公司营销副经理、工程师, 主要研究方向为营销管理。

施贵军(1974-), 男, 国网辽宁省电力有限公司营口供电公司计量室副主任、高级工程师, 主要研究方向为电能计量技术管理与研究。

范春雪(1978-), 女, 国网辽宁省电力有限公司营口供电公司综合事务管理、工程师, 主要从事综合类相关工作。

王海军(1972-), 男, 上海欣影电力科技股份有限公司部门总监、高级工程师, 主要研究方向为电力信息与通信、电力物联网、配网自动化。

张翼英(1973-), 男, 博士后, 天津科技大学计算机科学与信息工程学院海河学者特聘教授, 主要研究方向为物联网及其安全、安全密钥、智能电网等。