基于改进遗传蚁群算法的低压PLC网络路由方法

崔 莹
（广东电网有限责任公司珠海供电局，广东 珠海 519000）

摘要：在低压电力线通信网络组网过程中，节点间距离较远或信道环境较为恶劣的条件下，节点上电会形成多个网络短时共存现象，严重影响网络通信的可靠性，因此探讨基于带有冲突避免的载波侦听多路访问+时分多址（CSMA／CA+TDMA）混合协议的多网络快速融合方法。该方法可智能识别区域内存在多个网络，自主选取介质访问控制（MAC）地址最小的网络为多网络融合方向，解散MAC地址较大的网络，解决多网络不确定性融合问题。在此基础上，针对遗传算法在服务质量（QoS）参数约束下局部搜索能力差、难以得到按需路由最优解的问题，在非对称信道环境下提出基于改进遗传蚁群算法的路由热备份方法，该方法中源节点和目的节点不参与交叉、变异操作，有效避免了无效染色体的生成。采用最佳保留机制找到较优解，将较优解转换为蚁群算法的初始信息素，从而得到全局的路由最优解。仿真结果表明，相较于传统算法，所提方法更为有效。

关键词：泛在电力物联网；低压电力线通信；网络融合；路由方法；改进遗传蚁群算法
中图分类号：TM 73　　**文献标志码**：A　　DOI：10.16081/j.epae.202109005

0 引言

随着电网规模的扩建，电气设备种类及接入数量快速增长，使得传统电网较难满足人们当前的需求。泛在电力物联网[1-3]可融合智能电网和互联网，实现电网能量流、信息流与业务流的互联互通，有助于构建更加优质、稳定、智能的电力服务体系。泛在电力物联网内可以采用多种通信技术，低压电力线通信PLC（Power Line Communication）无需专业电缆，但存在拓扑动态易变、通信环境相对恶劣、干扰噪声无法预测等问题，导致通信可靠性较差。目前在PLC领域的国际标准有HomePlug AV、IEEE 1901、PRIME等[4-5]。上述标准在网络层涉及各自的通信机制，在一定程度上满足了信源与信宿间的通信需求，但未涉及如何提高路由通信可靠性。

近年来，研究人员在满足服务质量QoS（Quality of Service）约束的前提下提出了多种改进路由算法，但相关研究均是基于对称信道这一假设开展的。事实上，每个通信节点处的物理拓扑经常是不同的，等效负载运行状态也会变化，导致节点对信号的吸收程度不同。节点附近噪声种类、强度也不同。因此，节点间信道在部分条件下是非对称的。此外，改进路由算法建立的均是节点间单一路由，仍存在路由通信可靠性较低问题。文献[6]提出适用于低压PLC自动路由类蚁群算法，该算法可以发现故障节点，且无需动态监测信道状态以进行路由维护，提高了网络可靠性，但存在初始阶段耗时较大、易陷入局部最优等问题。文献[7]在类蚁群算法的基础上，提出基于遗传自适应蚁群算法的中继路由算法，该算法可提高最优寻优效率，但建立的均是单一路由，一旦路由发生故障，需重新建立路由，耗时相对较长。文献[8]对种群规模采用自适应操作，有效降低了初始种群不可行解的产生概率，算法能自适应调整种群规模，防止早熟现象发生，但算法搜索效率较低。文献[9]对遗传算子进行改进，根据个体自适应度的变化调整交叉和变异概率，较好地解决了局部搜索与全局搜索矛盾，但存在局部搜索能力较差的问题。文献[10]在文献[9]的基础上，根据个体自适应度变化自动调整交叉和变异概率，引入小生境思想保证基因的多样性，克服早熟和收敛速度较慢的缺点，但该算法未考虑建立路由热备份的问题，也未考虑信道非对称因素对通信过程的影响。

基于此，本文在非对称信道的条件下提出基于改进遗传蚁群算法的路由热备份方法，解决现阶段遗传算法在服务质量参数约束下局部搜索能力差、难以得到按需路由最优解的问题。首先，分析低压配电网的网络拓扑结构；其次，阐述基于带有冲突避免的载波侦听多路访问+时分多址（CSMA／CA+TDMA）混合协议的低压PLC网络融合方法，保证组网稳定性；再次，在组网稳定的基础上重点说明基于改进遗传蚁群算法的路由热备份机理；最后，仿真验证改进遗传蚁群算法的有效性。

1 低压配电网网络拓扑

1.1 低压配电网物理拓扑

低压配电网络的物理拓扑与配电对象环境有关。在不同的环境下各相分支结构不同，电气负载个数和负荷也不同。典型的低压配电网物理拓扑为树形结构，该物理拓扑由变压器二次侧电缆及与之

收稿日期：2021-03-19；**修回日期**：2021-07-09

相连的诸多电气负载组成[11],具体如图1所示。低压电力线信道具有频率选择性衰落的特性,高频载波信号在信道传输过程中会产生较大幅度的衰减,导致传输距离有限。在低压配电二次侧相间无载波信号耦合器的情况下,高频载波信号较难实现跨相传输,可以认为二次侧A、B、C三相彼此独立。基于此,以某一相为例,重点研究低压PLC网络的逻辑拓扑。

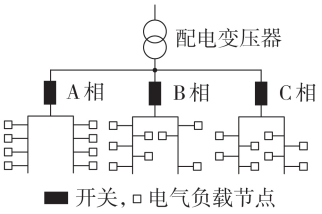


图1　典型低压配电网的物理拓扑

Fig.1　Typical physical topology of low-voltage distribution network

1.2　低压配电网PLC网络逻辑拓扑

为建立可靠的低压PLC链路,需建立电气负载(简称节点)间的逻辑拓扑。现阶段低压PLC网络逻辑拓扑常采用树形结构。在树形拓扑中,存在网关、代理和终端3种类型的节点。节点的投入与切出均会引起通信信道发生变化,甚至会使通信链路发生中断,导致低压配电网PLC逻辑拓扑动态变化,使得节点间的逻辑链路断开,降低了低压PLC网络的可靠性[12]。为了提高网络可靠性,低压PLC网络可以采用网状网的逻辑拓扑。下文将详细说明运用网络融合策略组建网状网逻辑拓扑的实现过程。

2　基于CSMA／CA+TDMA混合协议的低压PLC多网络融合策略

2.1　低压PLC局域网网络融合问题

本文借鉴计算机网络和无线通信网络中的局域网思想,给出适用于低压PLC局域网的功能性定义,即在满足宽带PLC国际标准的带宽范围且节点分布区域、个数均受约束的条件下,代理级数不超过6级,可以实现低压PLC功能的网络,称为低压PLC局域网。为了能够在低压PLC局域网中实现可靠通信需要先保证组网的可靠性。但在实际低压PLC局域网组网过程中会存在以下问题:①在节点间距离相对较远,或信道环境恶劣的条件下,节点同时上电后区域中将出现多个网络共存的问题;②在区域内形成多个网络后,如何确定融合规则将多网络进行有效融合的问题;③区域内会出现多个网关,如何将多个网关收敛为单一网关的问题。这些问题会严重影响组网的可靠性。

为了解决上述问题,本文探讨基于CSMA／CA+TDMA混合协议的低压PLC多网络融合策略,建立多条从网关至终端的较矮簇树,得到低压PLC局域网。

2.2　CSMA／CA+TDMA混合协议

在低压PLC网络中,使用较多的有CSMA／CA协议和TDMA协议。CSMA／CA协议支持变化的数据包尺寸,不要求严格的时钟同步,但当较多的节点同时响应网关查询指令再竞争发送数据时,易造成多节点同时繁忙,导致出现连续丢包,影响网络性能;TDMA协议能够提供无碰撞的数据包传输,但要求节点时钟同步,在一定程度上限制了信道时隙利用率。

鉴于现阶段CSMA／CA协议和TDMA协议的不足,本文以TDMA为基本多址接入方式,且采用固定与动态结合的调度算法,固定分配时隙采用TDMA接入方式,动态分配时采用基于竞争CSMA／CA方式,提出一种优化的CSMA／CA+TDMA混合协议,如图2所示。在组网过程中,节点在CSMA／CA时隙发送组网帧时,必须要保证在CSMA／CA时隙中传送完成,不能跨越当前时隙。在非竞争时隙中,节点不需要信道竞争,可单独占用被分配的TDMA时隙,发送组网帧。

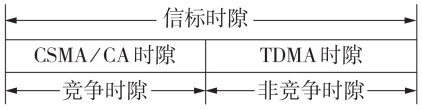


图2　CSMA／CA+TDMA混合协议示意图

Fig.2　Schematic diagram of CSMA／CA+TDMA hybrid protocol

2.3　基于CSMA／CA+TDMA混合协议的多网络融合机理

2.3.1　限制与约束

网络融合(属于组网)的本质是建立节点间的通信逻辑拓扑,为了便于研究,假设某相配电网分支有$n(n>1)$个节点且物理链路连通,约定如下:

1)节点均有唯一介质访问控制MAC(Media Access Control)地址;

2)在通信信道状态良好条件下,节点至少可与其他任意节点通信,即不存在孤立节点;

3)网关不重复分配终端设备标识符TEI(Terminal Equipment Identifier),且分配的TEI不回收;

4)节点间路由级数不超过6级。

2.3.2　状态-动作集及信道状态描述

在事件触发机制下,本地节点与邻居在满足特定事件发生条件时才能进行信息传递。假设在时刻t的节点状态为p_t,在时刻$t+1$的邻居状态为q_{t+1},在控制策略下,执行时刻t的节点动作a_t意味着从p_t发送组网帧或数据帧到q_{t+1},多个组网动作a_t的集合定义为动作集。

本文参考文献[13]并结合实际工程经验，根据不同的通信成功率CSR(Communication Success Ratio)，将低压电力线信道状态粗略地描述为以下3种。

1)状态α_1：若CSR值在[90%，100%)范围内，则认为信道状态良好，节点可以正确接收并解析组网帧。

2)状态α_2：若CSR值在(60%，90%)范围内，则认为信道状态相对较差，节点可以接收到组网帧，但组网帧解析的误码率相对较大。

3)状态α_3：若CSR值在(0，60%]范围内，则认为信道状态较为恶劣，组网帧无法在信道中进行有效传输。

受各种因素影响，信道状态会在α_1、α_2和α_3之间动态变化。在非对称信道中，组网帧能否成功送达，取决于上行和下行传输时的信道状态。根据上行和下行传输时的信道状态可知，组网帧发送结果如表1所示。

表1 组网帧与信道状态间的关系

Table 1 Relationship between network frame and channel states

信道状态		通信结果	处理机制	等效状态
上行	下行			
α_1	α_1	成功	发送下帧	α_1
	α_2	失败	重传	α_2
	α_3	失败	重传	α_3
α_2	α_1	失败	重传	α_2
	α_2	失败	重传	α_2
	α_3	失败	重传	α_3
α_3	α_1，α_2，α_3	失败	重传	α_3

由表1中的等效状态可知：在上行和下行通信均成功时，结果为成功，组网帧无需重传，直接发送下一帧，信道处于等效状态α_1；当上行或下行通信有一个方向失败时，结果为失败，此时信道等效状态为α_2或α_3，为降低通信失败概率，重传组网帧。若达到重传的最大次数后通信仍处于失败状态，则直接删除该组网帧，本次通信过程结束。

2.3.3 基于CSMA/CA+TDMA混合协议的多网络融合机理实现流程

采用文献[14]的组网策略可将单一区域的节点组建成稳定可靠的网络。但当节点间通信距离相对较远或信道环境较恶劣时，节点上电后区域内会出现多个网络以及多个网关。基于此，采用网络融合策略可将多个网络融合为单一网络，保证低压PLC组网的可靠性。具体地，为实现多网络的融合，在每个网络规模相差不大的条件下，节点通过智能选取MAC地址最小的网络作为多网络融合方向。该网络发出的组网帧也为高优先级的组网帧，从而解决多网络不确定性融合问题。上述多网络融合的具体步骤如下。

1)根据文献[14]提出的网关自主选取思想，当节点分布较为离散时，区域内将会自主选出多个网关。网关按文献[14]提出的组网方法对区域内的子节点进行组网，则区域内将形成多个网络，如图3所示。

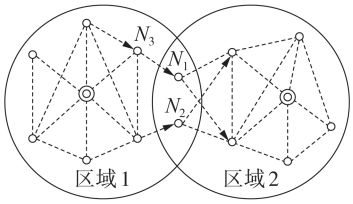


图3 网络融合示意图

Fig.3 Schematic diagram of network fusion

2)智能识别多网络存在机制。低压PLC本地网络的信号可能传输到相邻网络，因此会对相邻网络产生干扰。具体地，节点N_1、N_2可能会接收到其他网络的某个或某几个节点发出的信标帧，导致对本地网络产生干扰。由于信标帧内含有网络标识符信息(即本地网络的网关MAC地址)，节点根据接收到的网络标识符与本地网络标识符是否一致，判断区域内是否存在其他网络。若节点自主判断接收到的网络标识符与本地网络标识符不一致，则说明区域内存在多个网络。为了消除或减少其他网络对本地网络的干扰，也为了实现多个网络间的合并，应采取网络解散机制。

3)多网络自动解散机制。节点智能判断出网络标识符大小后，网络标识符较大的节点将创建网络解散数据帧，以广播方式发送给周围其他节点。成功接收到该数据帧的节点自动断开与其相连节点间逻辑链路的连接，并初始化所有参数，状态也切换为未注册子节点状态。为了使区域内网络标识符较大的网络尽快解散，引入下列2种机制。

(1)自动重发网络解散数据帧机制。节点N_1、N_2再次随机延时自调度该网络解散的数据帧(次数不超过3次)，若达到随机延时，则节点发送网络解散数据帧，接收到该数据帧的节点断开与其相连节点间的逻辑链路连接，初始化所有参数，状态切换为未注册子节点状态。

(2)自动复位机制。节点自调度网络复位的数据帧，使得节点在设定时间实现复位操作。

若图3中区域1的网络标识符小于区域2的网络标识符，则根据上述机制，可以解散区域2内的网络，节点复位，状态切换为未注册子节点状态。

4)自动组网机制。区域2内的节点在采用上述机制解散当前区域的网络时，区域1内的节点仍处于动态自组网过程中。区域1内的节点接收到网关

分配的信标时隙后,向通信范围内的节点发送信标帧。假定在某一时刻未注册节点N_1、N_2接收到区域1内已注册入网节点N_3发出的组网信标帧,则节点N_1、N_2将向其发送注册请求帧。节点N_3向节点N_1、N_2回复应答ACK(ACKnowledgment)帧,在非竞争时隙中向网关发送注册请求汇总帧。网关成功收到该帧后回复ACK帧,取出汇聚的新入网节点信息,将节点N_3至新节点N_1、N_2的路径信息分别存入路由表,完成至新节点N_1、N_2的前向路径学习。然后网关再向代理N_3发送注册确认汇总帧(包含为新入网的节点N_1、N_2分配的TEI)。代理N_3接收并回复ACK帧,创建关联指示帧,以广播方式为目的节点N_1、N_2分配TEI。新节点N_1、N_2接收到TEI后,将其经节点N_3至网关的反向路径信息分别存入路由表,完成反向学习。原区域2内其他节点的入网方式与节点N_1、N_2的注册入网方式相似,直至节点均入网完成为止,网络融合过程结束。

当网络融合(即组网)过程结束后,在不考虑新节点入网和老节点退网等情况下,网络将进入稳定的动态运行及维护阶段。网络稳定运行为节点间的路由通信提供了条件。

3　基于改进遗传蚁群算法的低压PLC网络融合路由热备份方法

为了进一步保证路由通信的可靠性,本文提出基于改进遗传蚁群算法的低压PLC网络路由热备份方法。

3.1　路由热备份目标函数

本文将低压PLC网络抽象为一个无向赋权图$G=(V,E)$,其中V为节点集,E为链路集。由N个节点组成的网络可构成邻接矩阵$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{N\times N}$,元素$a_{ij}$满足式(1)所示的关系。

$$a_{ij}=\begin{cases}1 & (v_i,v_j)\in E\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

式中:v_i、v_j为节点。

为避免路由搜索过程出现环路,令邻接矩阵对角线元素$a_{ii}=0$。若$a_{ij}=1$,则表示2个节点相邻。类似地,也可构建图G赋权矩阵,若节点间链路相连,则链路值取为1;反之,则取为∞。

下面建立矩阵内任意两节点间路径热备份的目标函数。假定源节点为$S\in V$,目的节点$D\in V-S$,经过的代理集合$V'\subseteq V-S-D$。从源节点开始搜索,访问经过代理集的部分节点,到达目的节点的路径长度$f(S,V',D)$为:

$$f(S,V',D)=\sum_{(v_i,v_j)\in E} w_{ij}x_{ij} \tag{2}$$

式中:w_{ij}为赋权矩阵的元素;x_{ij}取值为0或1,分别表示选中和不选中节点v_i与v_j间的链路作为路由热备份。为此,下文首先制定路由热备份方案,然后提出改进遗传蚁群算法实现节点间的通信。

3.2　基于改进遗传蚁群算法的网络融合路由热备份实现方案

若在某一时刻网络中某个源节点与目的节点间存在通信需求,则源节点创建“路由请求”数据帧,通过广播方式发给其父节点。在逻辑拓扑中,源节点与网关相距较远,需通过代理转发数据帧至网关。源节点的父节点成功接收到“路由请求”数据帧,向源节点回复ACK帧,再转发该帧至其父节点。执行该机制,直至将该帧转发给网关。网关根据拓扑表信息,采用基于改进遗传蚁群算法计算源节点与目的节点间的路由热备份。然后网关创建“路由确认”数据帧,将路由热备份信息以广播方式转发给源节点。源节点接收到“路由确认”数据帧,解析帧信息,完成节点间通信。具体流程为:源节点创建与目的节点“通信”的数据帧,以广播方式向下一跳节点发送该数据帧;代理接收到数据帧后,回复ACK帧,重复上述过程直至将该数据帧转发到目的节点。若由于信道变化原因导致通信链路发生中断,则通信失败。为此,源节点采用次短路由完成通信。若源节点采用次短路由后通信仍然失败,则源节点启动第三短路由继续通信,直至完成节点间通信。若源节点采用3条路由进行通信均通信失败,则网关重新计算3条新路由,再次完成与目的节点间的通信。但遗传算法局部存在搜索能力较差、易早熟等问题,因此网关采用基于改进遗传蚁群算法计算源节点与目的节点间的路由热备份。基于此,本文针对遗传算法存在的缺陷,提出改进遗传蚁群算法求取路由热备份。

3.2.1　遗传算法和蚁群算法的基本原理

遗传算法是根据待求解最短路径的参数进行编码,随机产生一个种群,计算个体适应度,然后进行选择、交叉和变异操作[15],若满足收敛条件,则此种群为最好个体;否则对新一代群体重新进行选择、交叉和变异操作,直至搜寻到最优解为止。

蚁群算法采用正反馈机制,其求解最短路径的原理是后面的蚂蚁根据之前的蚂蚁遗留下的信息素浓度选择下一步的路径。但由于初期信息素匮乏,蚁群算法求解速度较慢,影响算法性能。

3.2.2　改进遗传蚁群算法的原理

为了解决上述算法存在的缺陷,本文利用蚁群算法局部搜索能力较强的特点弥补遗传算法局部搜索能力较差的缺陷[16],提出一种改进遗传蚁群算法:首先利用遗传算法全局快速搜索的优点求取源节点与目的节点间的最短路径,将其转化为蚁群算法的初始信息素,然后利用蚁群算法获取最短路由、次短路由及第三短路由(即路由热备份)。该算法的实现

流程如附录A图A1所示，具体步骤如下：

1）确定网络拓扑信息，对路径优化问题进行数学描述；

2）初始化遗传算法参数，包括种群规模、交叉和变异概率、进化代数、终止条件等；

3）采用随机初始化方式产生初始种群，即网络路径最初解；

4）计算初始种群中的个体适应度；

5）设置迭代初始值为1，采用选择、交叉和变异等操作产生新个体；

6）判断是否满足循环结束条件（即迭代次数是否达到最大进化代数），若满足则将最优解转换为蚁群算法信息素的初值，否则执行步骤4）；

7）初始化蚁群算法参数；

8）将蚂蚁放置在路径源节点上，根据状态转移规则选路径；

9）更新局部路径上的信息素；

10）当所有蚂蚁完成路径的选择后，更新全局信息素；

11）若计算得到源节点与目的节点间路由热备份则输出该路由热备份，否则转至步骤8）。

4 仿真结果分析

4.1 低压PLC网络融合仿真结果分析

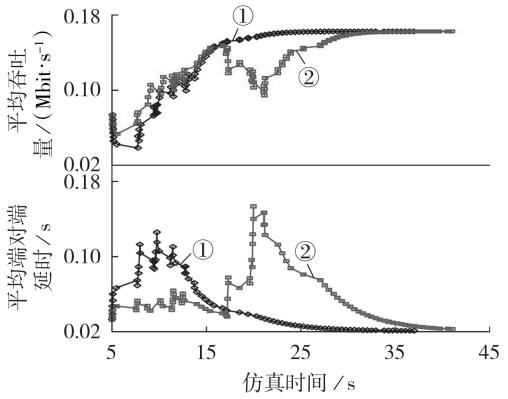
OMNeT++是面向对象的离散事件仿真工具，通过图形界面观察具体仿真结果，并收集统计数据。为了验证本文改进遗传蚁群算法的有效性，采用OMNeT++4.0进行网络融合（即组网）和路由通信的仿真，并将部分数据结果导入MATLAB 2016b进行数据分析。具体地，将智能配电房作为实际应用场景，在节点间距离相对较远的物理情况下，以分布在800 m×800 m区域内的30个节点为研究对象，仿真参数如表2所示。表中，RIFS、CIFS分别为响应帧间隔、竞争帧间隔。在非对称信道（上行、下行CSR值分别为96%、93%）和对称信道（CSR值为96%）这2种信道条件下的仿真网络融合拓扑如附录B图B1所示。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
带宽/MHz	1.8~2.0	CIFS/μs	100
通信半径/m	200	PHY层速率/ms	0.65
RIFS/μs	140	ACK时间/ms	6.65
数据分组长度/Byte	136	ACK帧长度/Byte	16

采用平均吞吐量最大值和平均值定量说明信道非对称因素对网关组网过程的平均吞吐量的影响，采用平均端对端延时最大值和平均值定量说明信道非对称因素对节点在组网过程中的平均端对端延时的影响。网关统计网络的信息如图4所示。由图可见：采用CSMA/CA+TDMA混合协议的组网方法在2种信道条件下的平均吞吐量最大值相等，而在非对称信道条件下的平均吞吐量平均值比对称信道条件下降低了1.1%；其在非对称信道条件下的平均端对端延时最大值和平均值相比对称信道条件下分别提高了26%和17.3%。



① 对称信道（CSR值为96%）

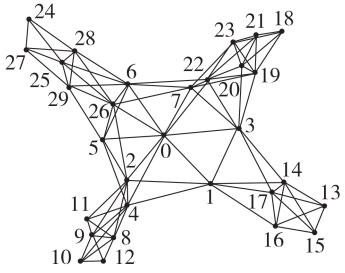
② 非对称信道（上行、下行CSR值分别为96%、93%）

图4 网关平均吞吐量和平均端对端延时

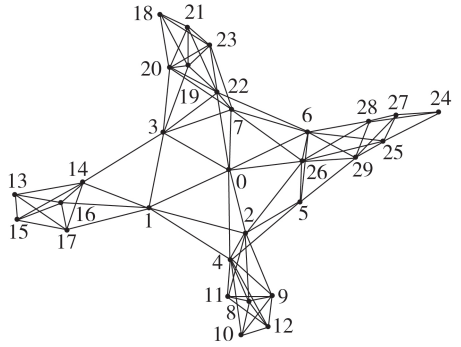
Fig.4 Average throughput and average end-to-end delay of gateway

4.2 基于改进遗传蚁群算法的低压PLC网络融合路由热备份仿真结果分析

网络融合阶段结束后，网络将会进入维护阶段，该阶段2种信道条件下的网络拓扑如图5所示。由



（a）非对称信道（上行、下行CSR值分别为96%、93%）



（b）对称信道（CSR值为96%）

图5 维护阶段不同信道条件下的网络拓扑

Fig.5 Network topologies under different channel conditions in maintenance stage

于采用适当的网络维护策略可以精简并优化网络的部分拓扑形式,附录B图B1所示的网络拓扑会与图5中个别节点间的链路连接有所不同,但网络整体拓扑形式无较大差别。具体的网络维护策略本文不再赘述,而是重点分析相比现阶段的方法,采用改进遗传蚁群算法进行路由通信的优势。

具体地,假设在某一时刻节点1与节点29需要通信,分别采用遗传算法[17]、蚁群算法和改进遗传蚁群算法在图5所示的2种网络拓扑中计算2个节点间最短路由,计算结果如表3所示。

表3　不同算法计算得到的路由结果对比

Table 3　Comparison of routing results calculated among different algorithms

算法	源节点	目的节点	代理(备份)
遗传算法	1	29	2-5-26-28
蚁群算法	1	29	2-5
改进遗传蚁群算法	2	29	2-5(2-26)

由表3可知,源节点采用遗传算法计算的最短路由需经过4个代理才可将数据包发送到目的节点,而采用改进遗传蚁群算法计算的最短路由仅需要经过2个代理就可以实现相同的效果,即实现了局部路由的搜索,从而可以得到按需路由。

为了进一步说明改进遗传蚁群算法的优势,本文对比分析不同算法的路由迭代次数,结果如表4所示。

表4　不同算法的路由迭代次数对比

Table 4　Comparison of routing iteration numbers calculated by different algorithms

不同算法	代理	迭代次数
遗传算法	2-5-26-28	1
蚁群算法	2-5	4
改进遗传蚁群算法	2-5	1

由表4可知,采用蚁群算法和改进遗传蚁群算法可以得到相同的最短路由,但采用改进遗传蚁群算法的迭代次数更少。同时,相比遗传算法,改进遗传蚁群算法在相同的迭代次数下可以得到更短路由。因此,从路径更短以及迭代次数更少这2个方面综合考虑,改进遗传蚁群算法在性能上优于蚁群算法和遗传算法。

考虑到蚁群算法的迭代次数比遗传算法和改进遗传蚁群算法的迭代次数多,为了能够进一步说明改进遗传蚁群算法的有效性以及信道非对称性对通信过程的影响,采用遗传算法及改进遗传蚁群算法在非对称信道和对称信道条件下计算通信的吞吐量和端对端时延,计算结果如表5所示。由表可以看出:受帧碰撞及非对称等因素影响,在对称信道(CSR值为96%)条件下,与遗传算法相比,采用改进遗传蚁群算法时的吞吐量增加了10.04%,端对端延时降低了9.12%;在非对称信道(上行、下行CSR值分别为96%、93%)条件下,与遗传算法相比,采用改进遗传蚁群算法时的吞吐量提高了15.4%,端对端延时降低了13.3%。

表5　不同信道条件下,采用不同算法时的吞吐量和端对端延时

Table 5　Throughput and end-to-end delay adopting different algorithms under different channel conditions

算法	吞吐量/(Mbit·s^{-1})		端对端延时/s	
	对称信道	非对称信道	对称信道	非对称信道
遗传算法	0.01292	0.009478	0.0841	0.11470
改进遗传蚁群算法	0.01422	0.010942	0.0764	0.09943

代理5发生故障时的网络拓扑如附录C图C1所示。在该种情况下,采用单径路由已无法实现节点间的通信,若仍采用单径路由通信方案,则网关需要重新计算符合当前拓扑的路由后,才能进一步满足源节点与目的节点间的通信需求,导致通信时延较长。若采用本文方法,则可通过直接切换到其热备份上实现节点间的通信,实时性较高。代理5故障的情况下,基于改进遗传蚁群算法进行路由热备份时的吞吐量和段对端延时如表6所示。由表可见,非对称信道(CSR值为96%)条件下的吞吐量相比对称信道(上行、下行CSR值分别为96%、93%)条件下降了73.9%,端对端延时提高了2.84倍。综上可知,基于改进遗传蚁群算法进行路由热备份比单径路由方法更有优势。

表6　代理5发生故障的情况下,采用改进遗传蚁群算法时的吞吐量和端对端延时

Table 6　Throughput and end-to-end delay adopting improved genetic ant colony algorithm when Proxy 5 malfunctions

信道条件	吞吐量/(Mbit·s^{-1})	端对端延时/s
对称信道	0.03882	0.02802
非对称信道	0.01011	0.10750

5　结论

在节点间距离较远或信道环境较为恶劣的条件下,区域内组网过程形成多个网络短时共存会严重影响网络通信可靠性的问题,本文探讨了基于CSMA/CA+TDMA混合协议的多网络快速融合策略,通过仿真可将多个网络有效融合,为网络通信提供了稳定的前期条件。在此基础上,针对遗传算法在QoS约束下局部搜索能力差、难以得到按需路由最优解的缺陷,本文提出了基于改进遗传蚁群算法的路由热备份方法,对节点采用基于改进遗传蚁群算法可以实现单播路由的热备份通信。本文所得主要结论如下:

1)单播通信过程中,在非对称信道条件下,相比遗传算法,采用基于改进遗传蚁群算法可以计算出源节点与目的节点间的最短路由,吞吐量提高了15.4%,端对端延时降低了13.3%;

2)在当前路由发生故障的情况下,采用改进遗传蚁群算法也可自启动路由热备份来实现节点间的可靠通信。

本文方法为低压PLC非对称信道条件下的节点的路由通信研究提供了一种新思路,具有较强的理论及实际意义。后续笔者将会从提高节点间组播通信性能方面着手,继续开展相关的基础理论研究工作。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 傅质馨,李潇逸,朱俊澎,等. 基于马尔科夫决策过程的家庭能量管理智能优化策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):141-148.
FU Zhixin,LI Xiaoyi,ZHU Junpeng,et al. Intelligent optimization strategy of home energy management based on Markov decision process[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(7):141-148.

[2] 史建超,谢志远. 面向电力物联网信息感知的低压电力线与微功率无线通信融合方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):147-157.
SHI Jianchao,XIE Zhiyuan. Fusion method of low voltage power line and micro power wireless communication for information perception of Power Internet of Things[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):147-157.

[3] 谢小瑜,周俊煌,张勇军. 深度学习在泛在电力物联网中的应用与挑战[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):77-87.
XIE Xiaoyu,ZHOU Junhuang,ZHANG Yongjun. Application and challenge of deep learning in Ubiquitous Power Internet of Things[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(4):77-87.

[4] 李腾,朱金大,蒋媛媛,等. 基于PRIME标准的低压电力线载波通信组网方案[J]. 电力系统自动化,2014,38(24):73-79
LI Teng,ZHU Jinda,JIANG Yuanyuan,et al. PRIME-based method for constructing power line carrier communication networks in low voltage distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(24):73-79.

[5] 崔莹,刘晓胜,徐殿国. 低压电力线通信网络性能的博弈分析及优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(11):122-128.
CUI Ying,LIU Xiaosheng,XU Dianguo. Game analysis and optimization of communication network performance for low voltage power line[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(11):122-128.

[6] 吴兆平,杨俊杰,高聪慧,等. 低压电力线载波通信路由算法研究[J]. 电测与仪表,2015,52(12):108-112.
WU Zhaoping,YANG Junjie,GAO Conghui,et al. Research of routing algorithm for lower voltage power line carrier communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52(12):108-112.

[7] 陈可,胡晓光. 基于遗传自适应蚁群系统算法的中继路由方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(2):571-579.
CHEN Ke,HU Xiaoguang. Method of relay routing based on genetic adaptive ant colony system algorithm[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2013,44(2):571-579.

[8] 金鑫. 种群规模自适应的遗传算法在配电网重构中的应用[D]. 北京:华北电力大学,2011.
JIN Xin. The application of genetic algorithm with adaptive population size in distribution network[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.

[9] 邝航宇,金晶,苏勇. 自适应遗传算法交叉变异算子的改进[J]. 计算机工程与应用,2006,42(12):93-96,99.
KUANG Hangyu,JIN Jing,SU Yong. Improving crossover and mutation for adaptive genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Applications,2006,42(12):93-96,99.

[10] ZHANG Jingjun,SHANG Yanmin,GAO Ruizhen,et al. An improved multi-objective adaptive niche genetic algorithm based on Pareto front[C]//2009 IEEE International Advance Computing Conference. Patiala,India:IEEE,2009:300-304.

[11] HENRI S,VLACHOU C,THIRAN P. Multi-armed bandit in action:optimizing performance in dynamic hybrid networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2018,26(4):1879-1892.

[12] 谢志远,史建超,胡正伟. 基于I-LDAQ算法的电力线通信QoS约束组网方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):2020-2031,2217.
XIE Zhiyuan,SHI Jianchao,HU Zhengwei. QoS constrained networking method for power line communication based on I-LDAQ algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(7):2020-2031,2217.

[13] 胡正伟,谢志远. 中继与队列相结合的电力线通信AMRS的分组传输方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3240-3248.
HU Zhengwei,XIE Zhiyuan. Packet transmission method for power line communication AMRS based on combination of relay and queue[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(19):3240-3248.

[14] 刘晓胜,崔莹,徐殿国. 低压电力线通信组网性能优化方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):16-21,42.
LIU Xiaosheng,CUI Ying,XU Dianguo. Performance optimization for low voltage power line communication[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(12):16-21,42.

[15] LORENZO B,GLISIC S. Optimal routing and traffic scheduling for multihop cellular networks using genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2013,12(11):2274-2288.

[16] SUN Yongjun,DONG Wenxin,CHEN Yahuan. An improved routing algorithm based on ant colony optimization in wireless sensor networks[J]. IEEE Communications Letters,2017,21(6):1317-1320.

[17] 胡正伟,谢志远,谢荣圆. 基于遗传算法的多QoS参数约束条件下的PLC路由搜索方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):162-169.
HU Zhengwei,XIE Zhiyuan,XIE Rongyuan. PLC routing search based on genetic algorithm under multiple QoS parameter constraints[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(5):162-169.

作者简介:

崔 莹(1987—),男,广东珠海人,博士,主要研究方向为低压电力线载波通信(**E-mail**:cuiying794758706@126.com)。

(编辑 任思思)

Low-voltage PLC network routing method based on improved genetic ant colony algorithm

CUI Ying

(Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.,Zhuhai 519000,China)

Abstract:In the networking of low-voltage PLC(Power Line Communication) network,multiple networks coexist for a short time when nodes are energized under the condition that the distance between nodes is relatively far or the channel environment is relatively harsh,which severely affects the communication reliability. Aiming at this problem,the multi-network rapid fusion method based on CSMA / CA+TDMA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoid+Time Division Multiple Access) hybrid protocol is explored. The proposed method can intelligently identify multiple networks in the area,select the network with the smallest MAC (Media Access Control) address as the multi-network fusion direction,dissolve the network with relatively big MAC address. It can solve the problem of multi-network uncertain fusion. On this basis,to solve the existing problems that the genetic algorithm has poor local search ability under the constraint of QoS(Quality of Service) parameters and is difficult to obtain the optimal solution of on-demand routing,a hot standby routing method based on improved genetic ant colony algorithm is proposed in asymmetric channel environment. Since the source nodes and destination nodes are not involved in crossover and mutation,the generation of invalid chromosomes can be effectively avoided. The optimal retention mechanism is used to find an approximate optimal solution,and then the approximate optimal solution is converted into the initial pheromone of ant colony algorithm to find the global optimal solution. The simulative results show that the proposed method is more effective than the traditional methods.

Key words:Ubiquitous Electric Internet of Things;low-voltage power line communication;network fusion;routing method;improved genetic ant colony algorithm

(上接第 202 页 continued from page 202)

Concentration prediction method based on Seq2Seq network improved by BI-GRU for dissolved gas in transformer oil

TANG Jian[1],HOU Huijuan[1],CHEN Honggang[2],WANG Shaojing[2],SHENG Gehao[1],JIANG Xiuchen[1]

(1. Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;
2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute,Shanghai 200437,China)

Abstract:Based on the GRU(Gate Recurrent Unit),the bidirectional multi-layer GRU is constructed. The encoder-decoder structure is introduced to build a Seq2Seq(Sequence to Sequence) network model. The time series data dependencies are obtained automatically by optimizing neurons and neural network structure. At the same time,the attention mechanism and the Scheduled Sampling algorithm are introduced to automatically obtain the key input time points significantly related to the prediction output at the current moment,so as to improve the accuracy of long-term prediction. In the case of gas concentration prediction under normal operating condition of transformer,compared with the methods based on simple GRU model and the simple Seq2Seq model,the proposed method has lower prediction error,and the prediction development trend is more in line with the true value. In the case of gas concentration prediction under abnormal operating condition of transformer,the average relative error and maximum relative error of the proposed model are respectively reduced by 0.73% and 2.31% compared with the LSTM(Long Short-Term Memory) network method.

Key words:power transformers;dissolved gas in oil;gate recurrent unit;Seq2Seq;attention mechanism;Scheduled Sampling algorithm

附录 A

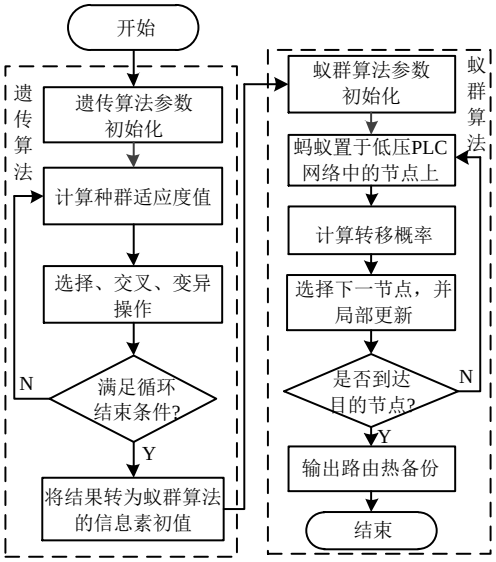
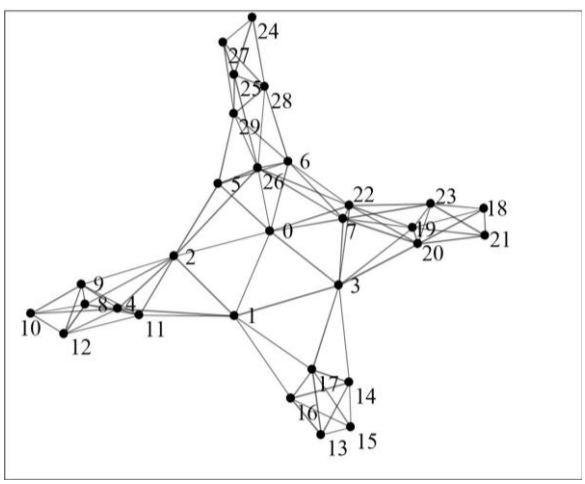


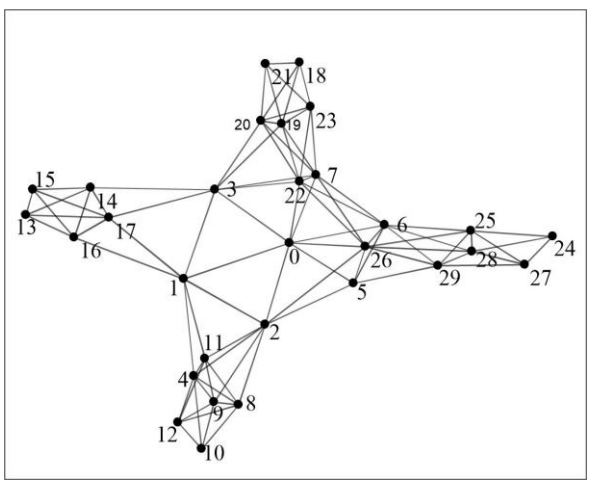
图 A1 基于改进遗传蚁群算法路由热备份方法实现流程

Fig.A1 Flowchart of hot standby routing method based improved genetic ant colony algorithm

附录 B



（a）非对称信道（上行、下行 CSR 值分别为 96%、93%）

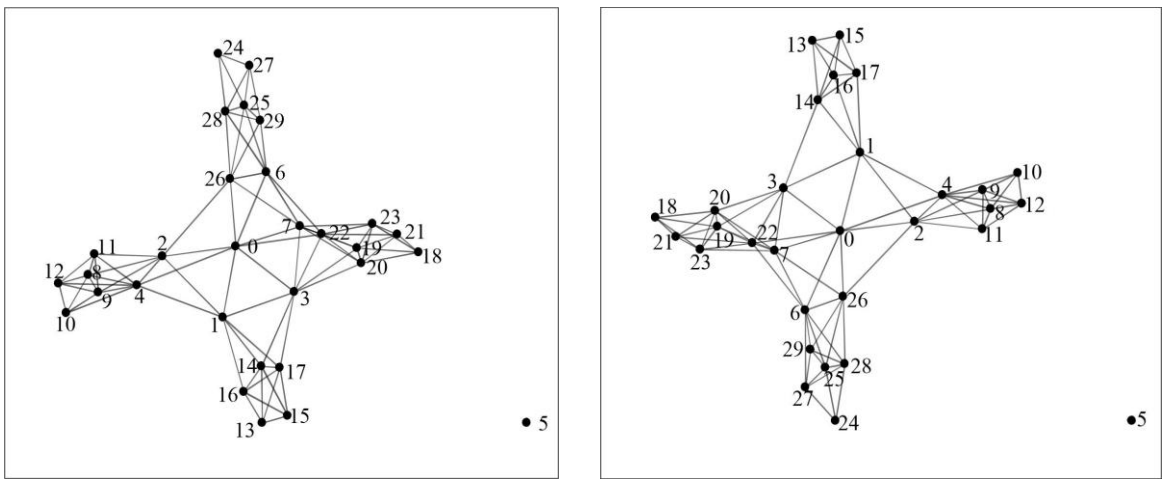


（b）对称信道（CSR 值为 96%）

图 B1 网络融合拓扑

Fig.B1 Network fusion topology

附录 C



（a）非对称信道（上行、下行 CSR 值分别为 96%、93%）　　（b）对称信道（CSR 值为 96%）

图 C1 代理 5 故障的网络拓扑

Fig.C1 Network topology when Proxy 5 malfunctions