

基于蚁群算法的低压配电网电力线通信组网方法

刘晓胜, 戚佳金, 宋其涛, 李 琰, 徐殿国

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Method of Constructing Power Line Communication Networks Over Low-voltage Distribution Networks Based on Ant Colony Optimization

LIU Xiao-sheng, QI Jia-jin, SONG Qi-tao, LI Yan, XU Dian-guo

(School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Reliability of power line communication (PLC) over low-voltage network (LVN) limits badly the application scale of PLC in practice. In order to solve this problem under conditions of available EMC and signal-to-noise ratio (SNR) and encoded/decoded mode and so on, key factor is to look for effective method which can be applied to constructing power line communication networks automatically and resuming operation after failure of communicating and advancing capability anti-destruction of networks. In this paper, typical physical topology and its characteristics of low-voltage network are analyzed in detail, topology model of power line communication over low-voltage network is given for simulation, and the means based on Ant Colony Optimization(ACO) is put forward, which is used to construct the power line communication networks without any available information of power line wiring in a building. On the basis of these, the effect and anti-destruction means are analyzed and tested by emulating experiments. This research work will provide general and effective method of narrow-band power line communication over low-voltage network.

KEY WORDS: power line communication; ant colony optimization; low-voltage network; constructing networks; automatic routing

摘要: 低压配电网通信可靠性严重限制了电力线通信实际应用规模。解决这一问题的一个关键技术在于在现有的电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC)、信噪比、编解码方式等条件下,寻找有效的低压配电网电力线通信自动组网和快速网络恢复以及提高其抗毁性的方法。该文详细地分析了典型低压配电网物理拓扑结构和特点,给出了低压配电网通信仿真拓扑模型,提出了一种适用于未知建筑物电力线拓扑结构条件下的蚁群电力线组网方法;在此基础上,通过仿真试验验证了该组网路由算法的有效性和抗毁性。该研究工作

为低压配电网环境下的窄带电力线通信组网提供了一种通用而有效的方法。

关键词: 电力线通信; 蚁群算法; 低压配电网; 组网; 自动路由

0 引言

随着信号处理等技术的发展,低压配电网被广泛认为是楼宇自动化、保安监控、办公自动化、远程抄表等领域替代专用网络的一种理想数字通信媒介;电力线通信(power line communication, PLC)被认为是一种重要的数字通信方式。然而,电力线信道的时变性、频率选择性以及噪声干扰强和信号衰减大等固有特点严重降低了PLC通信的可靠性^[1],制约着PLC通信的发展。为此,在现有的EMC、信噪比、功率控制、扩频、频谱分配和编解码方式等条件下^[2-6],寻找有效的低压配电网电力线通信自动组网和快速网络恢复以及提高其抗毁性的方法,是提高电力线通信可靠性、扩大应用规模的又一关键性技术。

PLC分为宽带PLC和窄带PLC。宽带PLC主要作为接入技术和家庭上网技术已经开始得到应用,相关组网技术由专用的宽带电力线交换机和路由器以及计算机系统完成^[7]。作为窄带电力线通信技术,目前没有相关的专用通信设备,已开展的PLC组网技术研究也很有限。主要集中在一般组网模式^[8]、基于分簇的PLC路由算法^[9]和基于总线分裂概念^[10]的路由协议研究。国外方面尚未见到相关内容的报道。

本文首先分析了典型低压配电网物理拓扑结构及其时变性特点,提出了一种未知物理拓扑结构

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(F200508); 黑龙江省科技攻关计划项目(GC06A130)。

环境下如何利用蚁群算法来搜索电力线通信最优路由的方法；根据低压配电网的信道变化，分析了该方法的抗毁性。仿真研究结果表明这种方法可以提高窄带电力线通信网络的自愈能力，实现快速网络构建与重构，为提高窄带电力线通信可靠性提供了一种有效的解决方案。

1 低压配电网与通信仿真模型

1.1 低压配电网拓扑结构与特点

工业与民用建筑低压配电网的接线方式一般应根据负荷的等级、容量和分布情况来确定。目前主要有放射式、树干式和环形式三种基本接线方式。从通信角度讲，一般低压配电网接线方式是基于树形的混合拓扑结构，并具有以下的特点，这些特点影响着电力线通信的组网方式和实现技术。

(1) 未知性。尽管建筑物内的配电网线路是固定不变的，但是，在绝大多数情况下，用户对于建筑物内的配电网具体情况却是未知的。在这种“盲”拓扑条件下，电力线组网无法利用相关信息来合理配置和优化通信路由。

(2) 时变性。由于用户经常在建筑墙体外任意延长和改变供电范围和供电对象，使低压配电网物理拓扑也具有了一定的“时变性”，这种时变性必然影响电力线的组网和通信。

(3) 多样性。一方面，每一个建筑物的低压配电网拓扑结构各不相同；另一方面，不但民用、办公用和工业用低压配电网所采用的接线方式有所不同，而且一般还需要区分照明用电和其他用途用电。这进一步增加了低压配电网结构的复杂性。

1.2 低压配电网通信仿真拓扑模型

一般地讲，用于民用的低压配电网不区分居民照明用电和其他生活用电。每个住户都采用单相供电，整个楼宇按楼层和/或单元配电，并确保三相供电平衡；对于工业用电(含办公，下同)的低压配电网，一方面，照明用电和生产用电需要独立配电；另一方面，三相供电和单相供电也经常会出现混合配线，这使得配电网拓扑结构变得比较复杂。图1是典型独立工业作业区建筑物墙内低压配电网的一部分拓扑结构图。其中每一个图标节点代表一个三相或单相供电墙面动力输出接口(插座)。支路①代表三相和单相混合供电配电情况；支路②代表全部三相供电情况；支路③代表全部单相供电情况。X、Y和Z分别代表3个主要供电控制支路节点。

对于图1所示的典型结构，很难直接利用该结

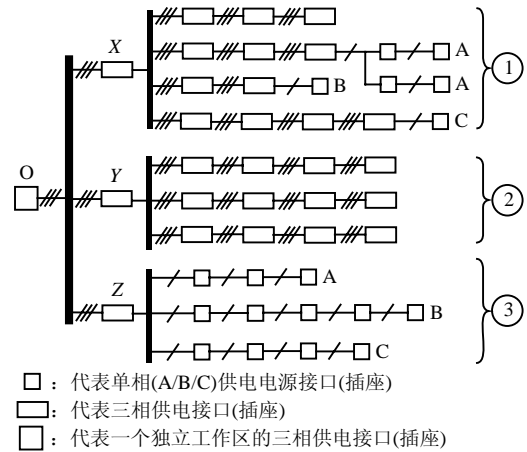


图1 典型低压配电网局部拓扑结构

构直接进行相关研究。实际上，电力线载波通信设备多为单相接入设备，只在某一相上进行电力线通信。因此，低压配电网的三相供电拓扑完全可以根据接入的具体情况等效为单相供电拓扑。也就是说，图1中的三相配电可以等效变换成三个单相供电拓扑，并由中心点连接在一起。图2是图1的A相配电的等效拓扑。需要补充说明的是：

(1) 中心节点0一般位于树形拓扑结构的根部，即图1中的O点；中心节点一般是一个三相电力线载波接入设备；其它每个电源输出接口都接入一个单相电力线载波模块(以下简称节点)。

(2) 图中线段只代表节点之间的物理连接关系，并不代表节点间的实际物理距离。例如，节点27和节点28之间的物理距离可能是十几米，也可能是几米，还可能是几厘米。

(3) 从通信角度讲，对于一个三相输出接口(插座)，当一个载波节点接入到某一相(例如A相的4号节点)时，则该位置的通信接口在其它两相(例如B相和C相的4号节点)的等效拓扑中就不应存在。

(4) 从通信角度讲，上述等效拓扑图中的节点仅表示在该动力输出接口处接有一个载波模块。原则上同一网络不允许A相、B相和C相出现一个

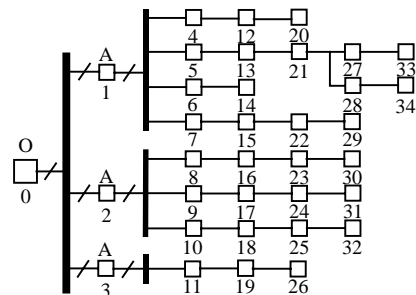


图2 A相低压配电网拓扑结构等效模型

Fig. 2 An equivalent topology model of LVN

以上的载波节点(中心节点除外)。若该接口处不存在载波模块,则视为直接的物理连通。此时它会随时给它所在信道(例如节点 1 和 12 之间)带来相关负载噪声。

不难看出,可以将图 2 作为不相关的、已经等效后的低压配电网通信仿真拓扑模型来使用。

2 基于蚁群算法的 PLC 组网

2.1 蚁群算法基本原理

蚁群算法(ant colony algorithm, ACA),也称蚁群优化算法^[11-14](ant colony optimization, ACO),是近年来发展起来的、受自然界蚂蚁搜寻食物行为启发得到的并行优化算法。蚁群算法利用单个人工蚂蚁迭代构筑和优化最优候选解;人工信息素和基于问题的启发式信息指导人工蚂蚁寻找最优解;当一个蚂蚁完成了它的一次完整搜寻过程,则它将在走过的路径上释放信息素;作为比较理想的路径将从更多的蚂蚁处得到信息素,从而使该部分路径得以加强;同时为了避免搜索停止,路径上的信息素会按照某一系数 ρ 挥发掉。不难看出,该算法是一种性能优良的启发式随机优化算法,采用正反馈机制实现分布式全局优化,通过信息素的不断更新达到最终收敛于最优路径上,算法无需进行大量的概率计算或建立复杂的数学模型来进行系统预测,可应用于通信网中路由的组合优化求解,能够大大提高系统的可靠性和鲁棒性。路由问题(routing problem, RP)是该算法典型应用领域之一。

2.2 基于蚁群理论的组网路由算法

PLC 多用于“一对多”的控制网,即一个控制器(中心节点,例如图 2 的 O 点)与它所负责管理的若干个终端设备节点(简称终端节点或节点)通信,各节点之间不需要直接的通信。因此,PLC 系统仅需要中心节点保存和维护一个到达终端节点的路由表,终端节点仅需要保存它到中心节点的路由以及可以直接与其通信的节点地址标识。这一点可以大大减小路由表建立和维护工作,降低系统复杂性。

不失一般性,假设:①任意相邻的两个节点都能够保证电力线通信正确和可靠;②通信逻辑拓扑图为无向图;③每一个接口(即图 2 每个节点)都接有一个载波模块,否则认为不存在该接口;④在一个中心节点控制范围内每个节点有一个唯一的地址编码(ID 号)。

(1) 优化目标函数的设计。

考察网络通信效果可用路径距离、信道带宽、平均通信量、通信开销、队列长度和时延等作为优化目标。这里采用中心节点到目标节点的“跳数”作为优化目标,采用“通信距离”作为约束条件。

所谓“跳数”就是指任意两个节点之间通信时,数据包到达目标节点所需被转发的次数。可以直接通信的节点,跳数为 0;需要通过 1 个路由器转发通信的两个节点,跳数为 1,以此类推。所谓“通信距离”这里是指网络上可以直接通信的两个节点所跨过的节点个数+1。相邻两个节点的通信距离为 1。该距离会随着低压配电网信道质量而变化。PLC 能够组网通信的必要条件是通信距离大于等于 1。

为了获得最少跳数,优化目标函数可以表示为

$$\begin{cases} \min N_h(X) \\ \text{s.t. } |X(i)-X(j)| \leq 2 \\ X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: N_h 为中心点到目的点的跳数,它表征了路由的简洁性和快速性。理想信道情况下,中心节点与其它所有节点均能直接通信,即跳数为 0; X 为网络中载波节点集; N 为节点个数;约束条件要求任意一个节点最小可通信距离可以跨过 1 个节点(这里是为了保证通信可靠性和方便给出仿真验证,特意设定很小的通信距离。一般情况通信距离会远大于 2)。

(2) 全局更新规则的确定。

每次迭代发出的人工蚂蚁个数选择一般根据网络的复杂程度决定。图 2 每条支路长度很有限,故选择每批蚂蚁量为 10 只。考虑到电力线通信组网仅需要建立中心节点 O 到各节点的路由,因此,将人工蚂蚁均放在中心。当完成一次迭代,则按式(2)进行全局信息素更新

$$\begin{aligned} \tau(r, s) &= (1 - \rho) \cdot \tau(r, s) + \rho \cdot \Delta\tau(r, s) \\ \Delta\tau(r, s) &= \begin{cases} K \cdot (L_{ib})^{-1} & (r, s) \in \text{迭代最优路径} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ρ 为迭代最优更新时的信息素挥发系数,取 $\rho=0.02$; K 为系数,取 $K=5\ 000$ 。 ρ 和 K 的选择可以调整迭代最优路径信息素的增长速度。 L_{ib} 表示每次迭代最优路径的跳数(即每次迭代 10 只蚂蚁中最少的跳数)。对迭代最优线路进行信息素增加,可以使搜索过程具有指导性,蚂蚁的搜索主要集中在迭代最优线路周围。

(3) 局部更新规则的改进。

局部更新规则即对每只蚂蚁走过的路径都进

行更新,它反映了每一只蚂蚁曾经走过路线对后续蚂蚁选择路由的一种贡献。局部信息素更新按下式进行:

$$\tau(r,s) = (1-\xi) \cdot \tau(r,s) + \xi \cdot \tau(0) \quad (3)$$

式中 ξ 为局部更新时的挥发系数。试验中 $\xi=0.04$ ($0<\xi<1$)。 $\tau(0)$ 为信息素的初始化值(即如果两个节点可以直接通信,那么这条直接可通信的线路信息素初始化为 $\tau(0)=10$)。 ξ 的引入使蚂蚁搜索时避免都集中到同一条线路上,有利于新路径的发现。 ξ 越大搜索的范围会越大,但同时收敛的效果变差。

(4) 不同拓扑情况的仿真试验。

不失一般性,图2可以认为是一种不同的典型局部低压配电网电力线通信拓扑结构图。

图3以图2为例,求取中心节点0到节点34的路由寻优 Matlab 仿真结果。仿真每次迭代采用10只蚂蚁, $\rho=0.98$, $\xi=0.96$, $\alpha=1$, $\beta=1$, $\eta(ij)=1$, $\tau(0)=10$ 。可以看出,通过19次迭代搜索,即可收敛到路由最优线路为0-5-21-34。对于其它节点,中心节点可以进行类似的搜索过程,完成到其它各节点路由的寻优。

此外,大量仿真试验表明,基于蚁群算法的方法可以很好地在未知网络拓扑情况下,有效地建立起来整个网络的路由。这里需要补充说明的是:①由于蚂蚁事先并不知道食物源路径,因此,其搜索过程具有随机性和启发性。该算法寻优过程与拓扑类型无关,原则上一定能够找到最优路径,适合于低压配电网拓扑结构未知环境下的路由搜索;②若网络拓扑规模和结构相似,则搜索次数基本相同;③对于临近中心节点的节点路由寻优过程更为快捷。

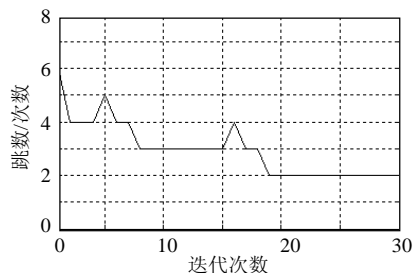


图3 搜索节点34的仿真结果

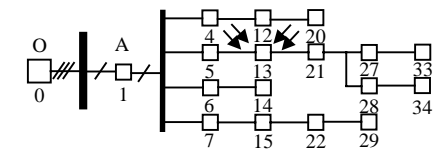
Fig. 3 Simulation result of searching node 34

3 组网路由算法的抗毁性分析

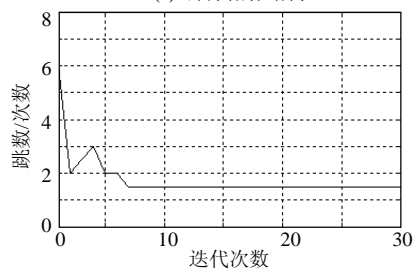
3.1 线路干扰状态下的算法抗毁性分析

低压配电网的时变性和信道的时变性都会导致通信网络逻辑拓扑的变化,这对组网方法的抗毁性提出了很高的要求。

当网络中某段线路受到干扰时,通信距离会发生变化,并引起网络拓扑的变化。以图2的物理拓扑结构为例。假设某个时刻与节点13相连的线路受到干扰,节点13只能与和它直接相连的节点5和21通信,如图4(a)。原中心节点0点到节点34的初始化最优路由为0-5-21-34,跳数为2。此时5-21之间因为线路干扰已经无法通信。当中心节点需要与节点34通信时,则启动对该节点的路由维护进程,其仿真结果如图4(b)。搜索到的最优路由线路为0-5-13-21-34,跳数为3。该仿真参数设置没有做任何修改。从仿真结果看,通过7次迭代搜索,即找到新网络环境下的最优路由线路。可见,基于蚁群算法的低压配电网路由算法能够适应线路干扰引起的网络拓扑变化,保证了网络的联通性和自愈性。



(a) 部分拓扑结构



(b) 搜索过程

图4 节点12附近信道被干扰的情况

Fig. 4 Situation of channel disturbed of node 12

3.2 节点故障状态下的算法抗毁性分析

网络中的节点因为自身故障原因失去网络通信能力时,虽然低压配电网物理拓扑没有变化,但是,它同样会引起网络通信拓扑的变化。

同样以图2中的物理拓扑结构为例。假设某个时刻节点5自身发生故障,失去了通信功能,此节点逻辑上在网络中消失,如图5(a)所示。此时原来含有节点5的所有路由信息均已失效,网络通信需要重新更新相关路由信息。

假设节点通信距离仍然为2,以节点34作为目标节点,利用与上述相同的蚁群组网路由算法和参数,对节点34重新组网。图5(b)为一次仿真试验结果。可以看到,通过5次迭代搜索,路由跳数最终收敛到2跳。多次仿真试验输出的路由线路均为以下四条线路中的一条,即0-13-27-34、0-13-28-34、0-13-21-34和0-1-21-34。这四条路径都是最优路由

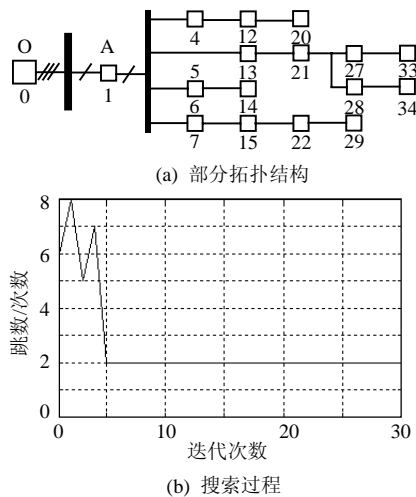


图 5 节点失效的情况
Fig. 5 Situation of failure of node 12

线路。可见，当网络中某节点自身发生故障引起网络拓扑结构发生变化时，基于蚁群算法的路由算法能够针对新的拓扑迅速找到最优路由线路，保证网络不会因为个别节点的故障影响其它节点的通信，提高网络的抗毁性。

4 试验研究与进一步的讨论

4.1 试验研究

路灯照明是低压配电网的一类典型负载，其基本拓扑形式为星型结构。每一个路灯管理单元范围由配电半径、街道长度和照度要求等因素决定。图 6 是基于一条街道建立的一套实际路灯照明应用系统结构示意图^[15]。其中编号为路灯节点载波通信模块编号。

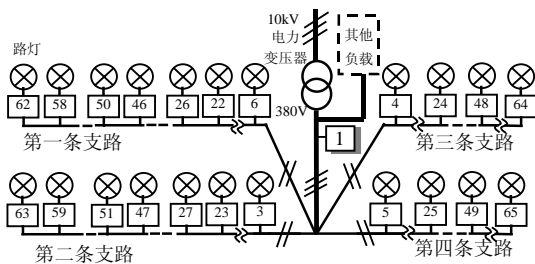


图 6 基于电力线通信的路灯监控系统拓扑结构图
Fig. 6 Topology structure graph of street lighting system based on PLC

系统上电后中心节点 1 自动建立整个网络的路由信息表。某一时刻，节点 35 被选作第二条支路的一级路由。为验证网络自动重组功能，人为使该点突然处于通信故障状态，导致中心节点与后续节点出现通信失败。此时，中心节点很快选出新的路由节点 37 来代替节点 35，保证了通信的可靠性。

4.2 讨论

(1) 时效性问题。当低压配电网电力线通信组网节点规模很大时，基于蚁群算法的 PLC 组网路由优化方法首次上电组网时比较耗时。当某一节点通信失败时，仅需要启动本节点新的路由搜索过程，不需要全部节点更新路由表，因此，正常维护实时性仍然比较好。

(2) 完整性问题。作为一套可以完全适用的网络通信算法，还需要考虑节点插入算法、节点退出算法、节点冲突算法和节点恢复算法等内容。由于篇幅限制，这里仅仅给出了初始化算法和维护算法，还有很多内容需要继续深入讨论和研究。

(3) 规模性问题。考虑到论述的方便，这里仅给出了 34 个节点情况的仿真结果。当网络节点增加时，搜索次数增加，但结论是一致的。

(4) 信号耦合问题。由于低压配电网负载的多样性，使得电力线通信存在相间耦合问题。尽管相间信号耦合不是很可靠，但是，在节点应用层做好校验的基础上，利用这一特点可以提高组网通信效率。

(5) 通信距离问题。实际通信距离会随着低压配电网信道质量的变化而变化。作者用随机法生成非均匀通信距离，得到了与等通信距离情况相一致的结论。

5 结论

电力线通信可靠性和通信距离以及组网等问题是电力线通信应用研究的几个重要相关内容。对于低压配电网物理拓扑已知情况，基于远程/网络可配置协议路由设定(组网)技术是一种有效、简单、方便和快捷的实现方法。而对于更多的低压配电网物理拓扑未知的情况，基于蚁群自动寻优算法则是一种更具普遍性的组网方法。该方法利用蚁群算法的启发式最优路由搜索，不仅保证了电力线通信网络组网的成功建立，而且可以在低压配电网信道条件发生变化时，提高了网络通信的自愈性和可靠性。该方法为窄带电力线通信控制类网络组网提供了一种有效的、值得借鉴的技术实现方案。

参考文献

[1] 姜霞, Nguimbis, 程时杰. 低压配电网载波通信噪声特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 30-35.
Jiang Xia, Nguimbis, Cheng Shijie. Noise characteristics investigation in low voltage power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 30-35(in Chinese).

- [2] 谢志远, 耿炬, 侯思祖. 基于判决反馈的正交频分复用低压电力线通信信道估计的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 66-70.
Xie Zhiyuan, Geng Xuan, Hou Sizu. Channel estimation based on decision on feedback for OFDM system in low-voltage power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 66-70(in Chinese).
- [3] 赵宇明, 王赞基, 郭静波, 等. 考虑功率谱限制的电力线通信比特分配算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 143-148.
Zhao Yuming, Wang Zanji, Guo Jingbo, et al. A novel bit-loading algorithm for energy spectrum limited power-line communication systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 143-148(in Chinese).
- [4] 郑紫微, 朱义胜, 杨知行. 多载波通信系统的实用功率分配算法[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 800-803.
Zheng Ziwei, Zhu Yisheng, Yang Zhixing. A practical power allocation algorithm for multicarrier Communication Systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 800-803(in Chinese).
- [5] 唐博进, 郭静波. 平稳信道的非迭代比特分配算法及其在电力线正交频分通信中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 8-13.
Tang Bojin, Guo Jingbo. A novel non-iterative dynamic bit-loading algorithm for stationary channels and its application in OFDM power line communications[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 8-13(in Chinese).
- [6] 郭静波, Cioffi J M. 配电网多用户通信中的动态频谱管理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 7-11.
Guo Jingbo, Cioffi J M. Dynamic spectrum management of multi-user communications over power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 7-11(in Chinese).
- [7] 程晓荣, 苑津莎, 侯思祖, 等. 基于移动代理的宽带电力线通信网络管理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 74-79.
Cheng Xiaorong, Yuan Jinsha, Hou Sizu, et al. Research of management model based on mobile agent for broadband power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 74-79(in Chinese).
- [8] 舒悦, 陈启美, 李英敏. 跻身未来的电力线通信(七) PLC 组网方案及应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 90-94.
Shu Yue, Chen Qimei, Li Yingmin. Predictive schemes for future power line communication_Part seven Power line communication network forms and their application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 90-94(in Chinese).
- [9] 俞天白, 杨将新, 赵玉玺. 楼宇控制系统中的电力线载波通信路由算法[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 88-91.
Yu Tianbai, Yang Jiangxin, Zhao Yuxi. A routing algorithm of edifice control system based on power line signal carrier[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 88-91(in Chinese).
- [10] 董亚波, 高锋. 低压电力线载波通信网络结构分析[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 58-62.
Dong Yabo, Gao Feng. Analysis of structure of carrier communication network for low voltage power line[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 58-62(in Chinese).
- [11] 郑相全, 郭伟, 刘仁婷. 自组网中一种基于跨层负载感知的蚁群优化路由协议[J]. 高技术通讯, 2005, 15(7): 6-11.
Zheng Xiangquan, Guo Wei, Liu Renting. A cross-layer load-aware based ant-colony optimization routing protocol for ad hoc networks (CLAOR) [J]. High Technology Letters, 2005, 15(7): 6-11(in Chinese).
- [12] 刘士新, 宋健海, 唐加福. 蚁群最优化——模型、算法及应用综述[J]. 系统工程学报, 2004, 19(5): 496-502.
Liu Shixin, Song Jianhai, Tang Jiafu. Ant colony optimization review: modelling, algorithms and applications[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(5): 496-502(in Chinese).
- [13] Shtovba S D. Ant algorithms: theory and applications[J]. Programming and Computer Software, 2005, 31(4): 167-178.
- [14] Nigel Bean, Andre Costa. An analytic modeling approach for network routing algorithms that use “ant-like” mobile agents[J]. Computer Networks, 2005, 49: 243-268.
- [15] 刘晓胜, 周岩, 戚佳金. 电力线载波通信的自动路由方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 76-81.
Liu Xiaosheng, Zhou Yan, Qi Jiajin. Method study of automatic routing for power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 76-81(in Chinese).

收稿日期: 2007-03-27。

作者简介:

刘晓胜(1966—), 男, 齐齐哈尔市人, 教授, 博士后, 主要从事电力线通信、网络通信、照明电子学、智能控制等领域研究, Liuxsh@hit.edu.cn;

戚佳金(1979—), 男, 浙江诸暨人, 在读博士研究生, 主要从事电力线载波通信研究;

宋其涛(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事蚁群算法研究;

徐殿国(1960—), 男, 大庆市人, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子、照明电子学、电机驱动等领域研究。

(编辑 王彦骏)