

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.009

基于最小流量的智能配电网 WSNs 通信模型*

方如举^{1,2} 王建平¹ 孙伟¹

(1. 合肥工业大学 电气与自动化学院 合肥 230009; 2. 许昌学院 电气(机电)工程学院 许昌 461000)

摘要:为了解决无线传感器网络(WSNs)的规模大、分布广而带宽有限与智能配电网对通信数据实时性和可靠性有上确界之间的矛盾,提出了一种基于最小流量的无线传感器网络路由通信模型。以无线传感器网络链路节点中接收到数据与发送出的数据之间的流量平衡为切入点并结合无线传感器网络的通信约束条件以及配电网数据传输的实时性需求,建立了基于最小流量的智能配电网无线传感器网络的路由通信模型。利用庞特里雅金极值的方法构建出所设计智能配电网无线传感器网络通信模型的哈密尔顿函数。利用极值存在的唯一性,从必要性出发判断出无线传感器节点是否在最优路径上。并给出了最优控制模型的求解过程。最后对采取所提出的通信模型的延时时间、网络能量消耗、数据传输能力以及数据传输的错误率对比测试。结果表明,所提出的通信模型完全能够满足智能配电网通信需求。

关键词:无线传感器网络;最优路径;智能配电网通信模型;哈密尔顿函数;性能测试

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

WSNs communication model based on minimum traffic for smart distribution grid

Fang Ruju^{1,2} Wang Jianping¹ Sun Wei¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Electrical Engineering & Mechano-Electronic Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between the features of the large scale, wide distribution and limited bandwidth for wireless sensor networks (WSNs) and upper bound of the reliable and real-time data communication, a routing communication model based on minimum traffic is proposed in this paper. Using the traffic balance between the received data and the transmitted data in WSN node as an entry point and considering the constraint condition for WSN communication and the real-time requirement of data transmission, the routing communication model based on the minimum traffic is established for WSN communication applied to smart distribution grid. Hamilton function of WSNs communication model applied in smart distribution grid is constructed by using the method of Pontryagin's extreme values. Utilizing uniqueness of extreme existence and combining with necessity, the proposed method can judge whether the wireless sensor nodes in the optimal path. The process of solving the optimal control model is also given. The communication performance including delay time, network energy consumption, transmission capacity and error rate of transmission data is tested for the proposed routing method. The results show that the proposed model can fully meet the requirement of smart distribution grid communication.

Keywords: WSNs; optimal path; communication model in smart distribution grid; Hamilton function; performance test

0 引言

无线传感器网络(WSNs)在智能配电网中电力设备

的远程监控、故障诊断和无线远程抄表等领域有着广泛的应用前景^[1-3]。早在2010年,美国国家标准技术委员会就将 ZigBee 协议明确列为所推荐的通信标准之一^[4]。由于无线传感器网络采取随机部署、自由组织形成网

络^[5-9],因此无线传感器网络节点的通信状态经常会受到一定限制,极易引起通信网络的拓扑结构以及数据传输的路径发生改变。可见,对无线传感器路由方式的研究始终是一个热点问题^[10-12]。

早在 2005 年 Akkaya 等人^[13]就提出了能量感知的 QoS 路由算法,通过评估链路代价作为所扩展的最短路径算法,为节点找到符合 QoS 需求的最小代价路由路径。2006 年,Felemban 等人^[14]在 SPEED 路由协议的基础上提出扩展的 MMSPEED 路由协议,该协议针对无线传感器网络中延时和可靠性问题,分别使用路径时间开销选优和空间多路径容错的方式逐一计算需要的传输路径的数目,保证数据的可靠传输。2009 年,Munari 等人^[15]提出了一种基于卡尔曼滤波器的多约束 QoS 路由算法。同年,Dhurandher 等人^[16]针对网络的 QoS 和安全性需求,提出一种 QDV 路由算法,该算法根据节点的通信能力和通信情况,动态调整路径所选择节点可信度。2010 年 Cobo 等人^[17]提出一种基于蚁群优化算法和仿生学簇头处理方法的 AntSensNet 路由协议,该协议采用分簇头的网络结构和前摄策略减少网络的拥塞,建立满足 QoS 要求的最优路由路径。针对无线传感器网络梯度路由算法在下行路由创建过程和能量更新机制中存在冗余控制开销的问题,文献[18]提出一种基于跨层协作和功率控制相结合路由机制。针对无线自组网对业务质量有着越来越高的需求以及 OLSR 协议存在的单条链路理想化问题、节点干扰理想化问题以及链路权值理想化问题,文献[19]提出了后验刷新策略、干扰切换策略和带全路径图策略来应对这些不足。针对无线通信在高业务负载条件下,文献[20]提出了一种能量均衡的路由协议,用粒子群优化算法(PSO)进行路由优化,有效减少了节点负担。为减少数据传输过程中的能量损耗以及提高无线传感器网络的生命周期,文献[21]提出了一种针对最短距离的蚁群控制算法,该算法通过保证数据传输的最短距离,从而把数据传输过程中的能量损耗最大限度降到最低。针对传统 Ad Hoc 路由协议因局部问题而影响网络的整体性能的缺陷,文献[22]提出了一种基于动态分区负载均衡的分布式成簇路由协议,该协议能够同时提高静态和动态路由特性。

综上所述可知,文献[13-15]所采用的路由规划方

法,是根据先前的链路知识来选择最优数据传输路径,具有算法简单、路由决策速度快等优点。但是该算法在提高数据传输的稳定性的同时也会增加网络开销和拥塞概率。文献[16]采用路由规划方法可根据网络拓扑变化,预测网络的通信状态和动态决策路由路径,但其动态路由决策过程增加了数据传输的时间开销,无法满足智能配电网数据传输对实时需求较高的目标。以蚁群算法^[17]为代表的仿生学路由技术,以节点通信能力作为最优数据传输路径选择依据,在该方式下,路由路径上节点可信度与其承担的通信容量成正比,当节点能力呈现饱和时,容易导致网络拥塞。而文献[18]提出的能量更新检测方法,增加了系统开销以及数据传输的延时时间。文献[19]仅仅考虑数据传输的实时性以及大流量业务下的应用要求,没有考虑不同业务背景下的需求,这与智能配电网通信状态不固定相矛盾。文献[20]在路由探测包和适应度函数上加入相应参数来实现能量均衡,但是没有提出参数计算的方法和依据。文献[21]中所提出的最短距离路由协议同样会造成“热点区域”从而影响整体性能。文献[22]的动态分区只是一种相对负载均衡,并不能保证在网络处于饱和状态实现负载均衡分配。

通过以上分析可以知道,目前已有的无线传感器网络的路由协议无法直接应用到智能配电网通信系统。针对这种需求,本文提出了一种基于网络数据流量最小的路由协议模型,从而解决了智能配电网对数据通信的实时性和可靠性有上确界与无线传感器网络带宽资源有限之间的矛盾。

1 智能配无线传感器网络通信结构布局

智能配电网结构复杂、分布范围较广造成与之配套的无线传感器网络的布局范围较大。但是无线传感器网络的通信受到带宽和频带的限制,使得单个无线传感器网络的节点数目不能太多。同时无线传感器的多级跳变的次数还会受到智能配电网通信延时时间的限制。当数据传输跳变的次数增多时,会造成通信数据在节点内消耗较多的等待延时,从而无法满足数据传输的实时性需求。智能配电网不同类型的通信数据^[23-24]对传输的可靠性以及实时性的需求如表 1 所示。

表 1 电力系统数据类型以及通信要求

Table 1 Power system data types and communication requirements

通信数据类型	内容	技术指标
遥控(遥调)	保护及重合闸远方投停、保护定值远方设置	遥控完成时间 ≤ 20 s 遥控正确率 $\geq 99.99\%$
遥信	开关状态事故、跳闸信号保护动作信号、异常信号终端状态信号、开关储能信号、通道状态信号、SF6 开关压力信号	开关量变位传递到主站 ≤ 10 s 遥信动作正确率 $\geq 99\%$
遥测	电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、温度、频率、电能量	模拟量遥测综合误差 $\leq 1.5\%$ 遥测合格率 $\geq 98\%$

通过表1的对比分析可以看出,通信数据对通信时间的要求最高,需要在10 s之内完成;遥控与遥调对通信完成的时间是相同的均需要在20 s智能完成;而遥测数对通信具体完成的时间没有具体规定。整个智能配电网无线传感器网络的通信结构布局包括信息采集、信息传输、信息处理和信应用4个环节,如图1所示。从图1中可知,智能配电网无线传感器通信网络设置3个层次:位于城市最外围的是110 kV线路,通过光纤连接构成网关节点;每个子网络的10 kV线路可以作为信息汇集节点或簇头节点,也就是无线传感器多跳的终点;普通无线传感器节点通过自组网的形式把采集到信息通过多级跳变的方式传送到目标节点。由于无线传感器是通过自组网的形式来进行信息传递,如何构建智能配电网无线传感器网络的通信模型,使得通信网络的性能最优以及通信质量最高显得尤为重要。因此,本文主要目的就是建立智能配电网无线传感器的通信模型,使得的通信数据在传输时所选择的路径最优,从而满足配电网中数据通信实时性和可靠性需求。

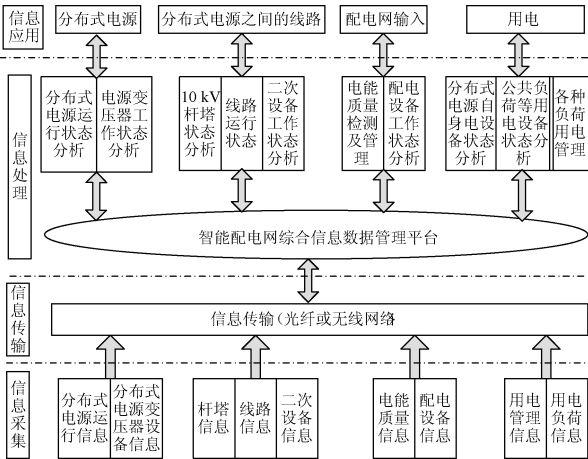


图1 智能配电网无线传感器网络通信结构布局

Fig. 1 Structure layout of WSN communication applied to smart distribution grid

2 智能配电网无线传感器网络通信模型

智能配电网无线传感器网络通信系统涉及电力系统、信息科学以及计算机技术等较多的学科领域,但是其核心内容仍然是无线传感器网络通信系统模型的建立和控制算法的设计。

由于智能配电网通信无线传感器网络覆盖众多具有不同传输速率需求的终端设备,因此在设计具有带宽和数据容量限制的无线传感器网络时需要考虑终端设备对数据传输率的需求。表2所示为不同终端设备对通信速的需求对比。从表2可以看出,由于受到带宽的限制,不同

终端设备在数据通信时对无线传感器节点的数量要求是不同的。

表2 配电网不同的远程终端设备通信速率

Table 2 Communication rate of different remote terminal unit in smart distribution grid

设备名称	数据包的大小	通信速率/Kpbs
变电站	90B	1.2 ~ 9.6
变压器	90B	0.01 ~ 0.3
配电线路	90B	0.3 ~ 1.2
智能仪表	90B	0.01 ~ 0.3
分布式电源	110B	5

2.1 智能配电网无线传感器网络通信的基本约束条件

图2所示为带有分布式单元的智能配电网 WSN 通信的节点链路配置示意图。从表2可知,分布式电源数据传输率约在5 Kbps,而无线传感器网络的最大带宽在250 Kbps,无线传感器网络最多可以实现对50个分布式发电终端单元进行数据采集。为保证节点设置的有效性,把目标节点放置在区域的最远端,用S表示。由于无线传感器网络是通过自组网的形式实现数据的传输,其可以选择的链路数量受到节点状态以及位置所限制。为防止分析不失一般性,假定在某时刻,节点A1 ~ Ak表示可能把通信数据传输到节点A的普通节点;节点B1 ~ Bm表示节点A可能把通信数据传递的下一节点;支路a1 ~ al表示流进节点A的链路;支路b1 ~ bn表示通信数据离开节点A的链路。

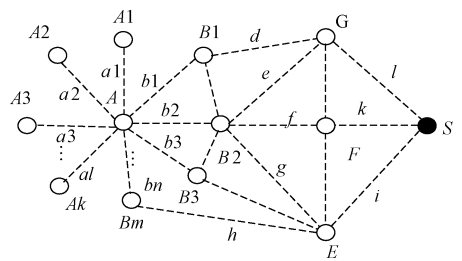


图2 无线传感器网络节点配置

Fig. 2 Configuration diagram of WSN nodes

对于由两个无线传感器节点形成的链路a, $u_a(t)$ 表示在任意一个时刻进入链路a的通信数据流入率, $v_a(t)$ 表示在同一时刻离开链路a的通信数据离开率; $x_a(t)$ 表示该时刻链路a上的流量。假定在开始时刻,无线传感器网络中的通信数据流量为0,即:

$$\sum_{n=1}^N x_n(t) = 0 \tag{1}$$

式中: N表示无线传感器网络中所有链路的数目。因此,对于链路a来说,由 $u_a(t)$ 、 $v_a(t)$ 和 $x_a(t)$ 构成的状态方程可以表示为:

$$\frac{dx_a(t)}{dt} = u_a(t) - v_a(t) \quad (2)$$

通过积分变换,式(2)可以进一步表示为:

$$x_a(t) = \int_0^t [u_a(\theta) - v_a(\theta)] d\theta \quad (3)$$

对于无线传感器网络,除了目标节点之外的任何一个路由由节点均满足流量守恒定律,即流进节点的流量与节点在该时段内新产生(从配电网中采集的数据)的流量之和与从节点流出的数据流量相等。这里用集合 Al 表示流入节点 l 的链路集合;集合 Bl 表示流出节点 l 的链路集合,对于节点 l 遵守流量守恒原则:

$$g_l(t) + \sum_{a \in Al} v_a(t) = \sum_{a \in Bl} u_a(t) \quad (4)$$

式中: $g_l(t)$ 表示节点 l 自身新产生的数据流量。为了构建链路上的流量与链路上数据传输率之间的关系,引入传输阻抗的概念。假定智能配电网 WSN 通信网络的流量在一个较短的传输时时间内是连续的,那么链路 a 上的流量 $x_a(t)$ 、流量的离开率 $v_a(t)$ 和该链路上的传输瞬时阻抗 $c_a(t)$ 之间的关系可以表示为:

$$x_a(t) = \int_t^{t+c_a(t)} v_a(\theta) d\theta \quad (5)$$

瞬时阻抗 $c_a(t)$ 的大小可以看作是路由协议所选择的数据传输路径上的数据流量有关。因此,可以等效为节点在链路上的传输时间,包括数据在前一节点的等待时间以及选择链路上的传输时间。那么当采样时间很短时认为 $c_a(t)$ 为常数,这样链路 a 上的数据离开率与链路 a 上的流量之间的关系(5)就可以简化成式(6)来表示。

$$v_a(t) = x_a(t)/c_a(t) \quad (6)$$

2.2 智能配电网无线传感器网络数据传输实时性约束条件分析

假定数据从节点 A 要传输到目标节点 S 需要经过 k 个节点的连续传递,因此其对应的链路条数总共应有 $k-1$ 条。假定 $L(n)$ 为其中第 n 条路径。那么数据从无线传感器节点 A 传输到目标节点 S 的总的延时时间包括节点内的等待时间、链路上的传输时间以及传输过程中的随机抖动时间共 3 部分。因此,总的延时时间可以表示为:

$$T_{lk} = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{l_{ei}}{c} + k \cdot t_{oi} + \Delta t \quad (7)$$

式中: l_{ei} 表示第 i 条链路的长度, t_{oi} 为节点内的延时, Δt 表示随机抖动时间, c 为数据在智能配电网无线传感器网络内的传输速度, T_{lk} 表示整条路径上的延时。由于智能配电网对通信数据具有实时性的要求:延时时间需要 \leq 智能配电网所规定的不同类型的数据通信所规定通信完成时间 t_0 。即:

$$T_{lk} \leq t_0 \quad (8)$$

不同类型的数据通信所规定通信完成时间 t_0 的取值范围如表 1 所示。

2.3 无线传感器节点安全分析

由于无线传感器网络通常远离用户,而智能配电网信息是不对外开放的,一旦泄露容易导致电网受到攻击,导致大面积停电。同时由于环境的恶劣,传感器节点也经常受到影响,导致工作异常,因此在传感器网络,数据在传输的过程需要避开这些异常的传感器节点。这里以传感器节点的信誉度作为衡量传感器节点是否安全的重要指标。假定 x 和 y 分别代表邻近节点检测到当前节点正常和异常的次数,以 δ 作为异常的放大倍数,用户可以根据智能配电网无线传感器网络安全级别自行设置。通常级别越高, δ 的值选取越大。那么邻近节点对当前节点的信誉度评估如下:

$$R = \frac{x+1}{x+\delta \cdot y+2} \quad (9)$$

如果当前节点的信誉度 R 的评估出来的值小于设定值,就认为当前节点是不安全的,最优路径的选取应避开当前节点。

2.4 智能配电网无线传感器通信网络模型

智能配电网无线传感器通信模型获得可以通过多种方式实现。目前最常用的实现方式有最短路径和最短时间的实现方式,通过最短路径实现的方式也就是跳变级数最少方式,这样建立的模型可能造成最短路径上的节点数据拥堵,数据传输等待时间较长以及造成通信数据的丢失,而同时在其他路径上的数据没有通信数据存在。使用最短时间的建模方式,由于对各个节点的延迟时间以及等待时间估计起来比较困难,因此实现起来的算法也比较复杂。针对上述方法的缺陷,提出了一种基于通信网络流量最小的智能配电网无线传感器通信模型。该模型在保证规定的通信时间内以及其他满足约束条件下,实现智能配电网无线传感器通信网络数据流量最少。在所建立无线传感器通信网络模型中, $x_a(t)$ 可以看作状态变量, $u_a(t)$ 可看作是控制变量。

$$\begin{cases} \min J = \sum_{a=1}^N \int_a^T x_a(t) dt \\ g_l(t) + \sum_{a \in Al} v_a(t) = \sum_{a \in Bl} u_a(t) \\ \frac{dx_a(t)}{dt} = u_a(t) - v_a(t) \\ v_a(t) = x_a(t)/c_a(t) \\ T_{lk} \leq t_0 \\ R \geq 0.6 \\ k + m < 50 \end{cases} \quad (10)$$

式中: N 为无线传感器网络链路的数目, k 表示可能把通信数据传输到节点 A 的传感器节点的数目, m 为节点 A 可能把通信数据传递的下一个传感器节点数目。信誉度 R 下限值设置为 0.6。

利用庞特里雅金极值原理求得通信网络的极小值方法,进一步构建出哈密尔顿函数为:

$$H = \sum_{a=1}^N x_a(t) + \sum_{a=1}^N \lambda_a(t) [v_a(t) - u_a(t)] + \sum_l \sigma_l(t) [g_l(t) + \sum_{a \in Al} v_a(t) - \sum_{a \in Bl} u_a(t)] \quad (11)$$

由哈密尔顿函状态方程可知,函数 H 有极值的必要条件为:

$$\frac{\partial H}{\partial x_a(t)} = \lambda_a(t) - \sigma_l(t) \geq 0 \quad (12)$$

根据哈密尔顿函数可进一步得知:

$$\frac{d\lambda_a(t)}{dt} = - \frac{\partial H}{\partial x_a(t)} \quad (13)$$

对于传感器网络的任一节点和链路,可求出哈密尔顿函数 H 对状态变量 $x_a(t)$ 的一阶偏导数:

$$\frac{\partial H}{\partial x_a(t)} = 1 - [\lambda_a(t) - \sigma_m(t)] \frac{1 - v_a(t) \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)}}{c_a(t)} \quad (14)$$

根据式(11)和(12)可以得到:

$$\begin{cases} u_a(t) = 0, \lambda_a(t) - \sigma_l(t) > 0 \\ u_a(t) > 0, \lambda_a(t) - \sigma_l(t) = 0 \\ u_a(t) = 0, \lambda_a(t) - \sigma_l(t) > 0 \\ a, l \in Bl \end{cases} \quad (15)$$

可见最优控制变量 $u_a(t)$ 受到 $\lambda_a(t) - \sigma_l(t)$ 的影响,特别当 $\lambda_a(t) - \sigma_l(t) = 0$ 时,其解无法唯一确定。此时需要借助求 $\frac{\partial H}{\partial u_a(t)}$ 对时间的各阶导数来求取奇异方程的唯一极值解。虽然利用庞特里雅金极大值原理求出的是最优控制的必要条件,但是实际中根据最优控制求取极值解仅有一个,因此可以认为根据必要性求取的极值也具有充分性。

由式(6)和(13)对于整个无线传感器网络的任意一条链路以及任意一个节点均有:

$$\frac{\lambda_a(t) - \sigma_m(t) = 1 + \lambda_a(t) \cdot [c_a(t) + x_a(t) \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)}]}{1 - [v_a(t) \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)}]^2} \quad (16)$$

式中: a 为任一链路, m 为任一节点。为了便于理解和简化,对式(16)作进一步简化,令:

$$\begin{cases} \delta_a(t) = \lambda_a(t) - \sigma_l(t) \\ \alpha_a(t) = c_a(t) + x_a(t) \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)} \\ \beta_a(t) = \frac{1 + \lambda_a(t)}{1 - [v_a(t) \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)}]^2} \end{cases} \quad (17)$$

式(16)就可以进一步改写成:

$$\delta_a(t) = \alpha_a(t) \cdot \beta_a(t) \quad (18)$$

$\delta_a(t)$ 表示节点 A 中的数据通过多级跳变的方式最终传递到终点 S 需要总共通信时间; $\alpha_a(t)$ 每增加一个传输数据对该路径总的传输时间的影响, $c_a(t)$ 表示新增加的通信数据的传输阻抗, $x_a(t) \frac{dc_a(t)}{dx_a(t)}$ 表示新增加的通信数据对原来从节点 A 点到终点 S 路径上通信数据的传输阻抗的增加量。 $\beta_a(t)$ 反映动态影响因素。设 $\lambda_l(t)$ 为节点 A 到终点 S 最优链路上阻抗;对于式(12)当 $u_a(t) > 0$ 时,此时有:

$$\delta_a(t) + \sigma_m(t) = \lambda_l(t) \quad (19)$$

说明链路 a 在最优路径上;而当 $\delta_a(t) + \sigma_m(t) > \lambda_l(t)$ 时,说明链路 a 不在最优路径上,需要重新寻找最优路径。

2.5 最优控制模型的求解

针对智能电网信息量庞大,本文采用一种对目标函数离散处理,通过对收敛性的判断来确定极值解。离散化处理规则:将采样周期 $[0, T]$ 划分为 $K + 1$ 单位时间段。约束条件为:在任意单位时间段进入链路 a 的通信数据不能在该采样周期内离开该链路。则模型(10)对应的型离散化结果为:

$$\begin{cases} \min J = \sum_{k=0}^K \sum_a x_a(k) \\ x_a(k) = x_a(k-1) + u_a(k-1) - v_a(k-1) \\ g_a(k) + \sum_{a \in Al} v_a(k) = \sum_{a \in Bl} u_a(k) \\ v_a(k) = x_a(k) / c_a(k) \\ T_{lk} \leq t_0 \\ R \geq 0.6 \\ k + m < 50 \end{cases} \quad (20)$$

根据以上分析,可得到求解最优路径的算法如下。

1) 对所有节点的进行信誉度评价,剔除信誉度低于 0.6 无线传感器节点作为最优路径上的节点的可能性。

2) 最初传输阻抗初始化,计算可能路径的传输阻抗以及传输延时。

3) 把不能满足时间约束条件路径剔除,保留能够满足时间约束条件的路径作为备选路径。

4) 根据式(20)计算每条备选路径上的流量和判断式(21)是否收敛,如果满足收敛条件转入步骤5),否则转入步骤3),重新迭代。

$$v_a(k) = \sqrt{\frac{\sum_a |x_a^{(k)} - x_a^{(k-1)}|^2}{\sum_a x_a^{(k-1)}}} \leq \varepsilon \quad (21)$$

5) 根据迭代次数最少的确定为最优路径,次之作为备选路径。

3 智能配电网无线传感器通信网络评价指标以及性能测试

3.1 智能配电网无线传感器通信网络评价指标

对于一个无线传感器通信网络,其性能衡量标准主要有反映通信数据实时性的延时时间,数据传输的可靠性以及网络失效性。

延时时间是指在选择无线链路时,要保证从普通传感器产生数据传输到数据终端的时间一定要小于数据通信实时性要求的最大延时。传输过程中受到外界的干扰,或在通信系统内部由于各个组成部分的质量不够理想而使传送的信号发生畸变等。当受到的干扰或信号畸变达到一定程度时,就会产生差错。因此无线通信网络的误码率也是衡量该网络的可靠性的指标之一。由于单个无线传感器节点的所带有的能量是一定的,每当一个数据通过无线传感器节点传送到终端,无线传感器节点的能量也就损失一点,当所有能量用完后,节点也就失去作用,这样就会造成有部分数据无法完成通信传输。因此无线传感器节点的死亡率与其对应的时间也作为衡量所构建的通信网络性能相应的指标。

3.2 模型参数设置与仿真分析

1) 无线传感器通信测试模型建立

智能配电网中无线传感器随机地布置无线传感器节点,本项目采取随机布置的方案。整个配电网分布在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的范围内。因此在该区域内随机布置 100 个无线传感器节点,单个传感器的通信覆盖半径定义在 20 m ,由于节点布置的随机性可能存在节点的重复布置或布置位置较近,有些区域的节点布置较少,无法保证每一个节点信息都有备用节点和备用回路。整个传感器网络可以根据需要通过自组网的形式,形成若干个网络。每个网络都有一个簇头节点来负责该子通信网络内其他普通传感器节点传递过来的信息汇集。每个普通传感器节点在一个轮次发送到汇聚节点数据量为 80 Kbit ,共接收 $5\,000$ 个轮次。单个无线传感器节点初始能量为 0.75 J 。因此,可以通过节点传递到基站的数据多少,无线传感器节点的生命周期以及能量消耗来衡量所构建的通信网络的性能。对于通信网络的性能还可以通过网络造成的延时时间来衡量。延时不仅和选择的路径有关而且还和无线传感器网络中的数据有关,也就是单个节点数据的产生率有关。节点的数据产生率从 $0 \sim 20\text{ Kbps}$ 逐渐增加,MAC 层通信协议按照 IEEE802.15.4 标准进行设置。在仿真过程中认为所有的节点处于安全状态,没有受到网络攻击,因此其信任度均满足通信需求。

2) 测试结果

图 3 所示为所提出的最小流量的路径规划结果。从图中设定编号为 100 传感器节点作为目标节点,而编号为 29 的传感器节点作为源节点,可见从源节点到目标节点之间的最优路径满足需求。

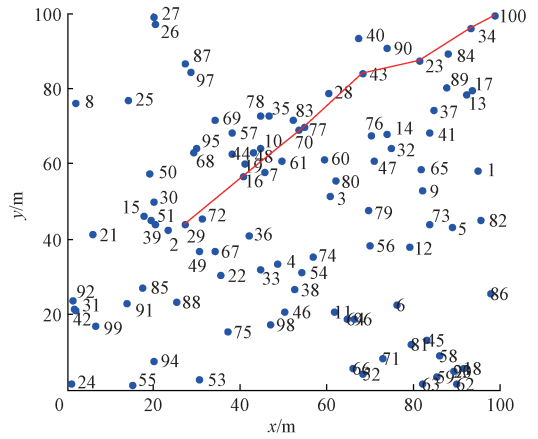


图 3 为所提出的最小流量的路径规划结果
Fig. 3 Path planning result for the proposed routing algorithm based on minimum traffic

图 4 所示为网络通信的延时时间对比结果,结果显示当通信模型采取最短路径模式,造成数据的等待时间增加,因此,造成总的通信延时最长。而采取最小流量和最短时间通信模式的延时时间相差无几。图 5 所示为通信网络在 3 种模式下无线传感器网络能量消耗量对比。可见最短路径模式在开始的每个轮次消耗的能量最少,最短时间模式消耗的能量最大,而最少流量模式居于中间,但是基本与最小模式相当,因此其网络的使用寿命也基本一样。图 6 所示为 3 种模式下从网络普通节点传输到汇聚节点通信数据对比。从图 6 中可以看出,由于通信模式的不同,节点在传输过程中造成通信延时,碰撞等现象,影响节点的有效传输。因此可以看出最小流量模

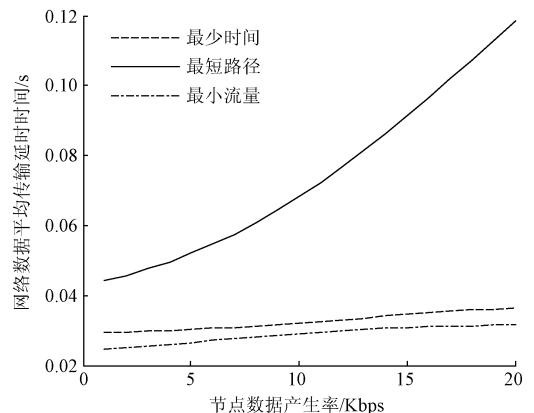


图 4 延时时间
Fig. 4 Result of delay time

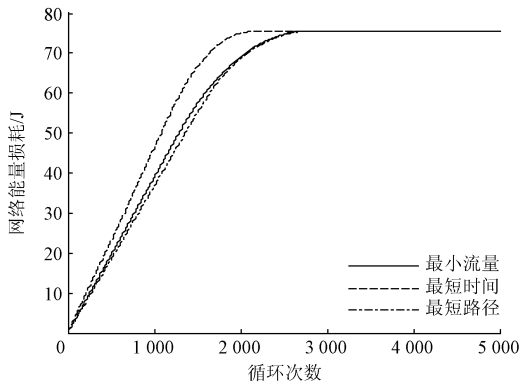


图5 能量消耗对比的结果

Fig. 5 Result of network energy consumption comparison

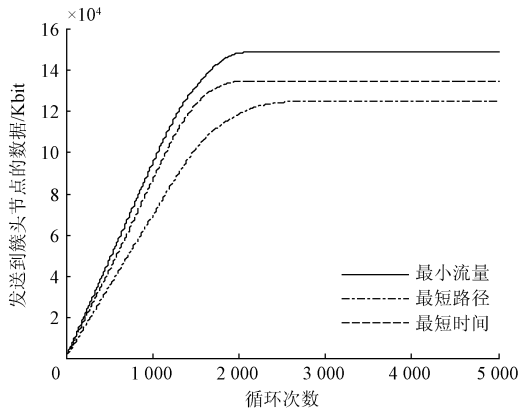


图6 传输数据能力对比

Fig. 6 Comparison for data transmission capability

式传输能力最强,而最短路径的传输能力最差。图7所示为汇聚节点接收数据错误率的对比,通过对比可以看出最小流量的错误率最低,而最短路径由于延时时间过长造成数据的变形因此错误率最高。通过仿真结果可以看出,所建立的智能电网的无线传感器网络的通信模型

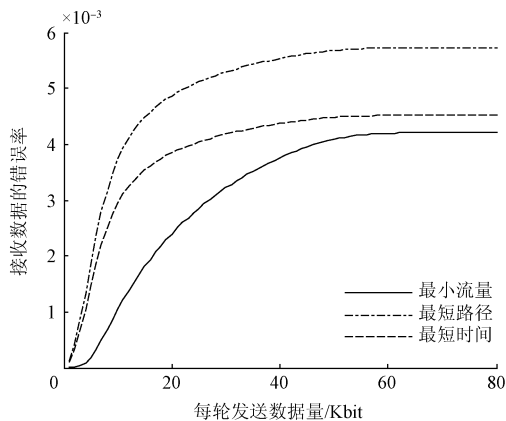


图7 接收数据的错误率

Fig. 7 Error rate comparison for received data

的理论分析结果与仿真完全一致,同时拥有最短路径和最短时间算法的优点。

4 结论

针对智能电网不同电压等级建立起不同无线传感器节点与之对应,并提出了一种智能配电网无线传感器网络通信结构布局。

针对智能配电网无线传感器基本约束条件、延时条件、安全条件以及最优控制目标,建立了智能配电网WSN通信模型。利用庞特里雅金极值充分性和必要性相统一的特性,通过建立哈密顿函数求极值的方法,对所构建模型进行最小值分析以及求解分析。

利用数据传输延时、网络能量消耗、网络传输能力以及接受数据的错误率来对建立的通信网络性能指标进行衡量。

通过仿真结果的对比分析,所建立的通信模型同时拥有最短路径以及最短时间的优点,能够满足智能配电网无线传感器网络通信需求。

参考文献

- [1] 陈建明,曹文思,邱道尹. 应用无线传感网络的分布式电力系统接地状态监测[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2266-2271.
CHEN J J, CAO W S, QIU D Y. Distributed detection of ground state using wireless sensor networks [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2266-2271.
- [2] 赵增华,石高涛,韩双立,等. 基于无线传感网络的高压输电线路在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 80-84.
ZHAO Z H, SHI G T, HAN S L, et al. Online monitoring system for high-voltage transmission line based on wireless sensor networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 80-84.
- [3] LU B, HABETLER T G, HARLEY R G, et al. Energy evaluation goes wireless [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2007, 13(2): 17-23.
- [4] LEON R A, VITTAL V, MANIMARAN G. Application of sensor network for secure electric energy infrastructure [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1021-1028.
- [5] 刘洲洲,张雷雷. 混合型无线传感器网络覆盖空洞修复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 1090-1097.
LIU ZH ZH, ZHANG L L. WSN network coverage scheme based on SA-PSO algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(7): 1090-1097.
- [6] 张冲,熊勇,房卫东,等. ZigBee 网络性能测试系统研

- 究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8):74-81.
- ZHANG CH, XIONG Y, FANG W D, et al. Research of ZigBee network performance test system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(8):74-81.
- [7] 李明,曹晓莉,胡卫军. 基于多目标和声搜索的无线传感器网络分簇路由算法[J]. 仪器仪表学报,2014,35(1):162-168.
- LI M, CAO X L, HU W J. Optimal multi-objective clustering routing protocol based on harmony search algorithm for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1):162-168.
- [8] 石为人,柏荡,高鹏,等. 无线传感器网络簇头半径自适应调节路由算法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(8):1779-1785.
- SHI W R, BAI D, GAO P, et al. Cluster-head range adaptive adjustment clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2012,33(8):1779-1785.
- [9] 洪榛,俞立,张贵军. 无线传感器网络自适应分布式聚簇路由协议[J]. 自动化学报,2011,37(10):1197-1205.
- HONG ZH, YU L, ZHANG G J. An adaptive distributed clustering routing protocol for wireless sensor networks [J]. Acta Automatica Sinica,2011,37(10):1197-1205.
- [10] LI X L, YU P S, LIU B, et al. Positive unlabeled learning for data stream classification [C]. Proceedings of SIAM International Conference on Data Mining,2009:257-268.
- [11] 张建军,李宁,刘征宇,等. 一种分布式车联网路由恢复方法[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(3):255-259.
- ZHANG J J, LI N, LIU ZH Y, et al. Distributed route recovery method in vehicle Ad Hoc networks [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 28(3):255-259.
- [12] 肖欣招,魏峰. 无线传感器网络能量改进路由算法研究[J]. 电子测量技术,2016,39(10):183-187.
- XIAO X ZH, WEI F. Energy routing protocol for wireless sensor network [J]. Electronic Measurement Technology, 2016,39(10):183-187.
- [13] AKKAYA K, YOUNIS M. Energy and QoS aware routing in wireless sensor networks [J]. Cluster Computing-The Journal of Networks Software Tools and Applications, 2005(8):179-188.
- [14] FELEMBAN E, LEE C G, EKICI E. MMSPEED: Multi-path multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(6):738-754.
- [15] MUNARI A, SCHOTT W, KRISHNAN S. Energy-efficient routing in mobile wireless sensor networks using mobility prediction [C]. Proceeding of IEEE 34th Conference on Local Computer Networks, 2009.
- [16] DHURANDHER S K, MISRA S, OBAIDAT M S, et al. An ant colony optimization approach for reputation and QoS-based security in wireless sensor networks [J]. Security and Communication Networks, 2009, 2(2):215-224.
- [17] COBO L, QUINTREO A, PIERRE S. Ant-based routing for wireless multimedia sensor networks using multiple QoS metrics [J]. Computer Networks, 2010, 54(17):2991-3010.
- [18] 任智,徐中浩,曹建玲,等. 基于跨层设计的无线传感器网络节能双向梯度路由算法[J]. 电子与信息学报,2013,35(1):133-140.
- REN ZH, XU ZH H, CAO J L, et al. A cross-layer energy efficient bidirectional gradient routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(1):133-140.
- [19] 康冬华,马林. 基于 QoS 策略库的 OLSR 路由改进方案[J]. 电子测量技术,2014,37(9):136-142.
- KANG D H, MA L. QoS strategy library improvement of OLSR [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(9):136-142.
- [20] 朱永红,丁恩杰,胡延军. PSO 优化的能耗均衡 WSNs 路由算法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(1):78-86.
- ZHU Y H, DING EN J, HU Y J. Energy balance routing algorithm for WSNs optimized with PSO [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1):78-86.
- [21] 李晓东,王东,曾凡智,等. 城市交通时间最短路径计算模型及应用仿真[J]. 计算机仿真,2014,31(1):172-175,223.
- LI X D, WANG D, ZENG F ZH, et al. Algorithm and simulation of time-dependent shortest paths of urban traffic [J]. Computer Simulation, 2014, 31(1):172-175,223.
- [22] 孙彦清,彭舰,刘唐,等. 基于动态分区的无线传感器网络非均匀成簇路由协议[J]. 通信学报,2014,35(1):198-206.
- SUN Y Q, PENG J, LIU T, et al. Uneven clustering routing protocol based on dynamic partition for wireless sensor network [J]. Journal on Communications, 2014, 35(1):198-206.
- [23] 中国电力企业联合会. GB50613-2010 城市配电网规划

设计规范[S]. 2010.

China Electricity Council. GB50613-2010 code for planning and design of urban distribution network[S]. 2010.

[24] 中国电力企业联合会. DL/T814-2002 配电自动化系统功能规范[S]. 2002.

China Electricity Council. DL/T814-2002 function specification of distribution automation system[S]. 2002.

作者简介



方如举,1975 年出生,合肥工业大学博士研究生,研究方向为智能电网、无线传感器网络。

E-mail: fangruju@163.com

Fang Ruju was born in 1975, Ph. D. candidate in Hefei University of Technology.

His research interest is electricity distribution network and wireless sensor networks.



王建平,1955 年出生,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为智能电网,无线传感器网络与信息获取、模式识别。

E-mail: wjphfut@126.com

Wang Jianping was born in 1955, Ph. D. Now he is professor and Ph. D. tutor in Hefei University of Technology. His present research interests include intelligent control and pattern recognition.



孙伟,1982 年出生,合肥工业大学博士、副教授,研究方向为智能电网、无线传感器网络。

E-mail: sw8207@ gmail.com

Sun Wei was born in 1982, Ph. D., associate professor in Hefei University of Technology. His research interest is electricity distribution network and wireless sensor networks.