

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307047

智能配电网 WMNs 数据分类传输的 延时性能评估分析*

方如举^{1,2} 赵 晗^{1,2}

(1. 华北水利水电大学电气工程学院 郑州 450000; 2. 许昌学院电气与机械工程学院 许昌 461000)

摘要:针对大规模无线先进测量仪表在智能配电网应用时,无法实现对不同类型传输数据的延时性能进行分别评估分析的不足,提出了一种保证实时性需求的射频网状网络(WMNs)数据分类传输的延时性能评估方法。在分析智能配电网 WMNs 架构基础上,借助马尔科夫链调制手段,建立起前后两个连续时隙起始阶段之间函数关系。为避免在求取稳态解过程中解高阶微分方程的困难,给出了一种基于误差迭代求取稳态工作点的求解方法并给出详细求解流程。在稳态工作点求出的基础之上,进一步建立实时性数据和非实时性数据在上行、下行传输过程中平均延时性能评估分析解析式。为了验证所提出的智能配电网 WMNs 延时性能评估方法有效性,分别对实时性数据和非实时数据在3种不同的传输率环境下延时性能进行仿真测试。实验仿真和测试结果表明,所提出的方法,能够实现对智能配电网不同类型的通信数据的传输延时进行性能评估分析,而且能够提升射频网状网络的传输性能。

关键词: 智能配电网; 分类传输; 延时时间; 性能评估; 马尔科夫链调制系统; 测量仪表

中图分类号: TP393、TN919 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Delay performance evaluation and analysis of data classification transmission for WMNs applied in smart distribution grid

Fang Ruju^{1,2} Zhao Han^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, China;

2. School of Electrical and Mechanical Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: A mathematical method is proposed to evaluate the delay performance of RF-Mesh-Networks that can realize data classification transmission and ensure real-time data requirements, for deficiency in evaluating and analyzing the delay performance of different types of transmission data when the large-scale wireless advanced measurement instruments are applied in smart distribution grid. Based on the analysis of the WMNs architecture of the smart distribution grid, the functional relationship between the initiation stages of the two consecutive time slots is established using Markov chain modulation techniques. In order to avoid the difficulty of solving high-order differential equations during the process of obtaining steady-state solutions, the solution method based on error iteration to obtain steady-state operating points is proposed, and the detailed solution process is also provided. On the basis of obtaining the steady-state working point, the analytical formula to evaluate the average delay performance of real-time data and non-real-time data for uplink and downlink transmission. To verify the effectiveness of the proposed delay performance evaluation method for WMNs applied in smart distribution grid, the delay performance of real-time and non-real-time data is simulated and tested, where they are set up three different transmission rates. The experimental simulation and test results show that the proposed method can achieve performance evaluation and analysis of transmission delay for different types of communication data in intelligent distribution networks, and can improve the transmission performance of WMNs.

Keywords: smart distribution grid; classification transmission; delay time; performance evaluation; Markov chain modulation system;

收稿日期: 2023-11-14 Received Date: 2023-11-14

* 基金项目: 国家自然科学基金(62103349)、河南省科技攻关项目(222102220121)、河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(YJS2024JD38)资助

measurement instruments

0 引言

无线 Mesh 网络是一种大容量、高速率分布式网络,其主要功能是实现将大量结构简单、造价成本廉价的装置与网络结构中的核心设备进行通信,具有自组网、自我治愈功能、低成本以及安装维护方便等优点^[1]。

智能配电网中使用先进的测量设施能够实现将居民、商业以及公共用电客户的智能仪表与电力公司的数据管理中心有效连接以及实现数据传输通信的共享服务^[2]。随着电力系统规模以及自身需求的不断增加,需要完成数据采集和传输通信的智能仪表数量成倍增多,才能保证智能电网负载管理和需求响应顺利实现^[3]。目前在智能电网中使用无线传输的技术主要有:WiFi 技术、LPWAN 技术、4 G/5G 技术以及无线传感器技术等,但是由于无线 Mesh 网络使用不需要授权的免费带宽以及在工业和医疗领域具有良好的应用基础,使得其在智能电网中的应用非常广泛^[4-5]。通过对智能配电网中以智能仪表(传感器)为基础组成的先进测量通信系统的性能分析,能够正确判断出相应的传感器节点损坏或者受到非法攻击,避免其接入通信网络,保证电力系统的安全性^[6-7]。智能配电网 WMNs 随着通信数据量的增加,数据传输的延时时间受到碰撞、拥塞以及重传等多种因素的影响,因此对其传输延时性能进行评价分析较为困难^[8]。采用干扰矩阵对智能配电网 WMNs 的延时性能进行评估是常用的技术手段之一,但是随着传感器节点增加,干扰矩阵的维数越来越高,数据处理越来越复杂,严重影响通信数据传输的实时性^[9]。目前对 WMNs 的性能进行评估主要还是借用无线通信领域的技术标准^[10-12]。文献[13]通过对路由器的位置进行优化,来提升无线 RF-Mesh 网络的性能。文献[14]提出了一种以 802.15.4 和 IPv6 为基础应用于低压配电网中无线 RF-Mesh 网络,以数据传输的正确率以及拓扑识别率作为通信网络性能衡量的标准。文献[15]提出了依据传输数据的丢失率作为衡量 WMNs 的性能指标。文献[16]通过局部搜索、遗传算法、禁忌搜索等策略,实现 WMNs 传感器节点布局的最优配置,并以网络的连接性、覆盖范围和稳定性作为性能指标的评价标准。文献[17]利用网络容量、吞吐率、延时时间以及连通性等参数来衡量 WMNs 的性能。文献[18]针对在电力系统中广泛使用的 Zigbee 协议,以网络的生命周期作为衡量 WMNs 的性能。通过文献[6-18]的对比分析可以看出,对 WMNs 性能评估缺少相应的统一标准。智能配电网中以智能仪表为基础的先进测量设施组成的 WMNs 可以看作是无线 Mesh

网络一种特殊应用形式:既需要考虑 WMNs 通信特征,同时需要考虑智能配电网中数据通信的自身需求^[19-20]。文献[21-23]针对智能电网中以智能仪表为基础的先进测量设施组成的 WMNs,认为数据的冲撞率、重传次数以及网络拥塞均会影响数据的传输时间,因此提出了以网络数据传输的平均延时时间作为衡量网络的性能指标。由于智能配电网中不同电力数据对数据传输的实时性需求不完全相同^[24],而文献[21-23]中认为所有的电力数据传输延时是相同的,这与实际的电网需求不一致,因此该方法直接使用在以智能仪表为基础的先进测量系统组成的 WMNs 中存在一定的缺陷。针对这种缺陷,提出一种满足智能配电网数据实时性需求的分类传输的延时性能评价方法,作为智能配电网 WMNs 数据通信的性能评估手段。

1 智能配电网 WMNs 架构

1.1 以智能仪表组成的 WMNs 基本架构

WMNs 在工程布局时除了需要满足末端最小接收功率要求外,还需要考虑路由器之间 Mesh 无线回传的稳定性以及足够的交迭深度。设智能配电网 WMNs 共有 N 个传感器节点, R 个路由节点以及 G 个数据采集器。集合 $V = N \cup R \cup G$ 表示整个智能配电网 WMNs 系统拓扑结构中节点的总数量。系统的拓扑结构示意图如图 1 所示。传感器节点作为 Mesh 网络的普通节点,一方面需要采集智能电网中相应的电气参数,同时还承担转发其他仪表采集的电气参数的任务;路由节点只负责转发智能仪表采集的电气参数,起到中继节点的作用;数据采集器是通信网络中数据最终的汇聚节点。后续的分析中以网络中第 i 个节点为例进行分析,用 $N(i)$ 表示节点 i 的邻近节点的集合。

1.2 缓冲队列节点调度模型

根据文献[24]电力行业规范要求可知,智能配电网通信数据可以分为遥信、遥控、遥调以及遥测 4 类,其中遥信、遥控、遥调对数据传输的实时性有要求,而遥测数据对数据传输的实时性没有要求。对于以智能仪表为节点构成的 WMNs 网络,虽然每个传感器节点从智能配电网中采集的数据是遥信、遥控、遥调、遥测 4 类中的一种,但是每个节点同时还需要承担转发其他传感器节点采集到的数据任务,因此在每个传感器节点缓冲队列中的数据如果按照先到先排的顺序进行排列,无法满足配电网对实时性数据优先传输的需求。虽然实际的配电网工程案例中,实时性数据在数量上远远低于非实时性数据,但是实时性数据在重要性和紧急性远远高于非实

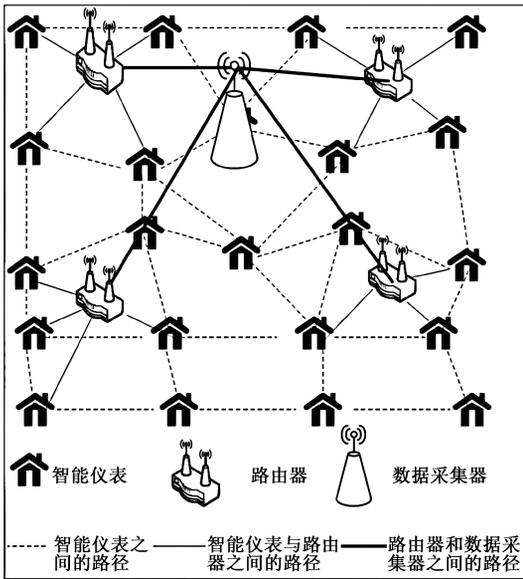


图 1 智能仪表为基础的 WMNs 架构

Fig. 1 WMNs architecture based on smart meters

时数据,为了保证电网的安全运行,实时数据的传输要优先得到保证。

IEEE802.15.4 标准采用的单信道的数据传输模式,不同类型的数据占用信道和使用信道的机会均等,在传输过程中形成无序的公平竞争。依据电力工业通信规范要求,智能配电网中不同类型的电力数据(遥信、遥控/遥调、遥测)传输的实时性和可靠性具有不同的服务质量要求。需要对不同类型电力数据提供不同的服务质量。

依据这种需求,对节点缓冲队列中的数据重新排列,将实时性数据排在队列前面,非实时性数据排在队列的后面,同一类型数据按照先到先得的规则进行排序调度模型如图 2 所示。

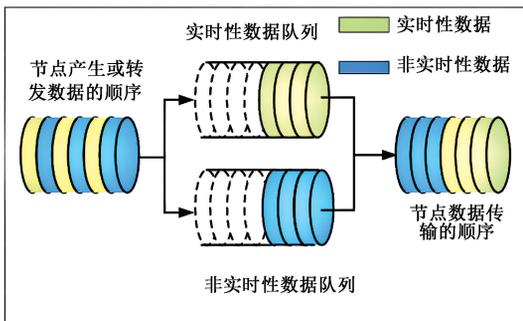


图 2 WMNs 节点内数据队列的调度模型

Fig. 2 Scheduling model of data queue in WMNs node

1.3 WMNs 通信网络物理层模型

以智能仪表为基本单元构成的 WMNs 网络,数据传

输带宽频率以 900 MHz 为中心,网络中的智能仪表共享带宽资源。当节点 i 向节点 j 传输数据的过程中,发生碰撞的情况是:节点 j 的邻近节点集合 $N(j)$ 至少存在其他一个节点在同一时间使用同一频率向节点 j 发送数据。

1.4 WMNs 通信网络 MAC 层模型

将 WMNs 通信网络中的数据传输时间分成多个时隙序列,单个时隙持续时间为 $t=0.7\text{ s}$,每个时隙开始阶段实时性数据传输或重传的概率为 p_{r0} ,非实时性数据传输或重传的概率为 p_{r1} 。假定在数据传输过程中,如果发生碰撞,无论是实时性数据还是非实时性数据均不能被正确接收,需要重新传输,如果没有发生碰撞,数据将会被正确接收,当数据没有被接收,数据会一直重传下去,直到被正确接收,不限制重传的次数。

1.5 WMNs 通信网络路由策略模型

上行数据和下行数据的传输均采用最短路径传输数据,路由采用静态路由策略。定义 $\Omega_u(i)$ 为智能仪表 i 上行最短路径链路集合; $\Omega_d(i)$ 为智能仪表 i 下行最短路径链路集合,且 $\Omega_u(i)$ 和 $\Omega_d(i)$ 具有相同路径,只是数据传输的方向相反。为后续分析方便,同时还定义以下与路由相关的参数。 $\alpha_{r0}(j)$:从节点 i 传输到节点 j 的实时性数据流量占节点 i 传输总流量的百分比; $\alpha_{r1}(j)$:从节点 i 传输到节点 j 的非实时性数据流量占节点 i 传输总流量的百分比; $\zeta(i)$:以节点 i 为中继节点的最短路径集合; $\Gamma(i)$:节点 i 实际将数据传输到临近节点集合。 $\zeta(i)$ 和 $\Gamma(i)$ 均是节点 i 的临近节点集合 $N(i)$ 的子集。

1.6 智能配电网通信数据产生的特征

智能配电网中实时性数据和非实时性数据的产生具有一定随机性,均服从泊松分布,因此,它们的平均值也服从泊松分布。当节点 i 分别为智能仪表、路由器以及数据采集器节点时,其数据的传输率可分别表示为式 (1)~(3):

$$\lambda(i) = \lambda_{u0} + \lambda_{u1} + \zeta(i)(\lambda_{u0} + \lambda_{d0} + \lambda_{u1} + \lambda_{d1}) \quad (1)$$

$$\lambda(i) = \zeta(i)(\lambda_{u0} + \lambda_{d0} + \lambda_{u1} + \lambda_{d1}) \quad (2)$$

$$\lambda(i) = N(\lambda_{d0} + \lambda_{d1}) \quad (3)$$

式中: λ_{u0} 和 λ_{u1} 分别为 WMNs 通信网络上行数据中实时性数据和非实时性数据的平均产生率; λ_{d0} 和 λ_{d1} 分别为 WMNs 通信网络下行数据中实时性数据和非实时性数据的平均产生率; N 为节点 i 邻近节点的数量。

1.7 智能配电网 WMNs 通信网络拓扑结构示意图

图 3 为包括 4 个智能仪表,3 个路由器和 1 个数据采集器构成智能配电网 WMNs 通信网络拓扑结构示意图。图中 s_1, s_2, s_3, s_4 为智能仪表,代表普通的 Mesh 节点,除了承担采集智能配电网数据的任务,还要承担转发由其他节点发送的通信数据的任务; r_1, r_2, r_3 代表路由器节

点,本身不采集配电网数据,只承担转发其他节点发送过来的通信数据的任务; c 为数据采集节点,是上行数据最终的汇集点。WMNs 实现数据的双向传输:一方面将数据由智能仪表传输到数据采集节点,另一方面还要将数据中心下发的指令传输到相应的智能仪表。

根据参数的定义以及结合图 3,可以计算出任何一个节点的 $\alpha_{i_0}(j)$ 、 $\alpha_{i_1}(j)$ 以及 $\Gamma(i)$ 。以代表智能仪表的节点 s_4 为例,节点 s_4 的邻近节点包括路由器节点 r_1 、 r_2 、 r_3 以及数据采集器节点 c ,可得 $\Gamma(s_4) = \{r_1, r_2, r_3, c\}$ 。可以看出节点 s_4 向路由器节点 r_1 、 r_2 、 r_3 传输的实时性数据所占总流量的比值分别为 $\alpha_{s_4,0}(r_1)$ 、 $\alpha_{s_4,0}(r_2)$ 和 $\alpha_{s_4,0}(r_3)$,且在数值上相等。同样,节点 s_4 向路由器节点 r_1 、 r_2 、 r_3 传输的非实时性数据所占总传输流量的比值 $\alpha_{s_4,1}(r_1)$ 、 $\alpha_{s_4,1}(r_2)$ 和 $\alpha_{s_4,1}(r_3)$ 也相等。节点 s_4 向路由器节点传输的实时性数据和非实时性数据占总流量的比值可以表示为式(4)、(5):

$$\alpha_{s_4,0}(r_1) = \frac{\lambda_{d0}}{3(\lambda_{d0} + \lambda_{d1}) + 4(\lambda_{u0} + \lambda_{u1})} \quad (4)$$

$$\alpha_{s_4,1}(r_1) = \frac{\lambda_{d1}}{3(\lambda_{d0} + \lambda_{d1}) + 4(\lambda_{u0} + \lambda_{u1})} \quad (5)$$

按照同样的方法,可以得到节点 s_4 向数据采集器节

点 c 传输的实时性数据和非实时性数据占总流量的比值可以表示为式(6)、(7):

$$\alpha_{s_4,0}(c) = \frac{4\lambda_{u0}}{3(\lambda_{d0} + \lambda_{d1}) + 4(\lambda_{u0} + \lambda_{u1})} \quad (6)$$

$$\alpha_{s_4,1}(c) = \frac{4\lambda_{u1}}{3(\lambda_{d0} + \lambda_{d1}) + 4(\lambda_{u0} + \lambda_{u1})} \quad (7)$$

同理,可以计算出路由器节点 r_1 向节点 s_1 、 s_2 传输实时性数据和非实时性数据流量与节点传输总流量的比例,可以表示为式(8)~(11):

$$\alpha_{r_1,0}(s_1) = \frac{\lambda_{d0}}{\lambda_{u0} + \lambda_{u1} + \lambda_{d0} + \lambda_{d1}} \quad (8)$$

$$\alpha_{r_1,1}(s_1) = \frac{\lambda_{d1}}{\lambda_{u0} + \lambda_{u1} + \lambda_{d0} + \lambda_{d1}} \quad (9)$$

$$\alpha_{r_1,0}(s_4) = \frac{\lambda_{u0}}{\lambda_{u0} + \lambda_{u1} + \lambda_{d0} + \lambda_{d1}} \quad (10)$$

$$\alpha_{r_1,1}(s_4) = \frac{\lambda_{u1}}{\lambda_{u0} + \lambda_{u1} + \lambda_{d0} + \lambda_{d1}} \quad (11)$$

对比式(4)~(11),可以看出不同节点的 $\alpha_{i_0}(j)$ 、 $\alpha_{i_1}(j)$ 与节点自身的种类、采集或转发的数据类型、相应类型数据的平均产生率和节点所在最短路径的数量等多种因素相关。

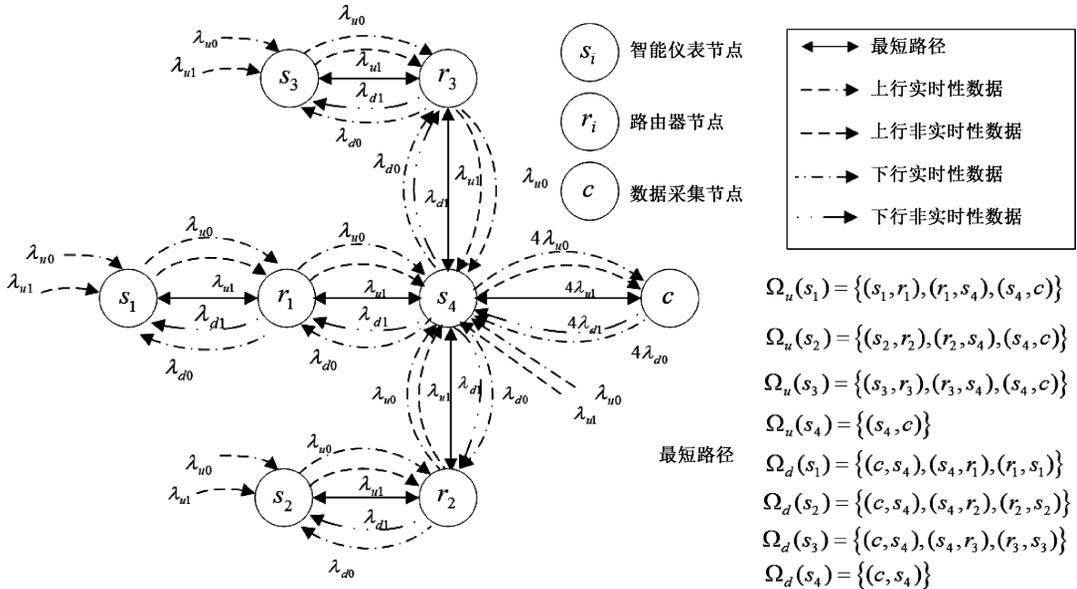


图3 智能配电网 WMNs 结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of WMNs for smart distribution grid

2 基于马尔科夫链调制智能配电网 WMNs 延时性能评估分析

在智能配电网,由智能仪表为基本单元构成的 WMNs 通信网络中,当前节点数据传输的概率与节点数

据传输前后状态相关,因此节点的传输概率并不固定。整个节点的状态在一个时隙周期内可以分为3个阶段:起始阶段、传输阶段以及结束阶段,分别用 $S_B(i, t)$ 、 $S_T(i, t)$ 以及 $S_E(i, t)$ 表示。图4详细给出了节点 i 在一个完整时隙周期内 $S_B(i, t)$ 、 $S_T(i, t)$ 、 $S_E(i, t)$ 以及下一个周期 $S_B(i, t + 1)$ 相互转换的过程。

WMNs 的延时计算, 实现对整个网络的延时性能进行评估, 需要找到配电网 WMNs 的稳态工作点。由式 (12) 可以看出, 数据智能配电网 WMNs 系统 $t + 1$ 时隙起始阶段与 t 时隙的起始阶段是一个 3 阶微分方程, 直接求解较为困难。而借助式 (13), 当连续两次时隙过程初始值的差值小于预设的误差精度时, 就认为找到稳态工作点, 具体求解的流程如图 5 所示。

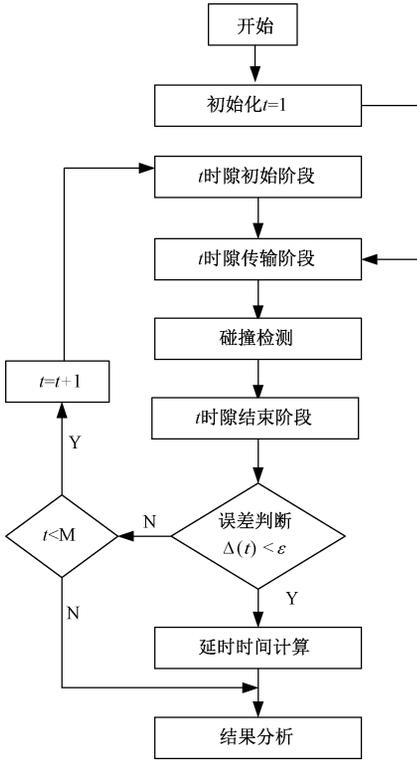


图 5 稳态求解取算法流程

Fig. 5 Flow chart of algorithm to seek steady state point

在开始阶段, 智能配电网 WMNs 组网完毕, 并以最短路径方式计算数据的传输路径。假定时隙 $t = 1$ 开始阶段, 节点队列内实时性数据和非实时性数据均为 0。因此, 在 $t = 1$ 状态概率 $\pi_B(i, 0, 0, t) = 1$ 。而对于任意 $n_0 \in (1, Z_0)$ 以及 $n_1 \in (1, Z_1)$, $\pi_B(i, n_0, n_1, t) = 0$, 从时隙 $t = 2$ 开始, 每个时隙的开始阶段概率、传输阶段概率以及结束阶段的概率需要反复迭代计算。当连续两个时隙的差值 $\Delta(t)$ 小于设定值 ε 时或者迭代次数超过设定值 M 时, 迭代结束。一旦找到稳定运行点, 需要对延时时间进行计算, 进而评估智能电网 WMNs 的性能。当循环次数高于设定值依然无法找到稳定运行点时, 需要分析产生的原因: 是否由于发生碰撞的概率较大, 或者是系统发生拥塞或者网络中路由器以及数据采集器的设置不合理。

2.2 无线传感器网络的延时性能分析

假定 WMNs 上行最短路径和下行最短路径分别用 $\Omega_u(i)$ 和 $\Omega_d(i)$ 表示; 节点 i 上行实时性数据和非实时性

数据传输的延时时间分别用 $D_{u0}(i)$ 和 $D_{u1}(i)$ 表示; 下行实时性数据和非实时性传输的延时时间分别用 $D_{d0}(i)$ 和 $D_{d1}(i)$ 表示。节点 i 的上行数据的传输过程: 首先需要将数据传输至位于最短路径上的邻近节点 j , 再通过邻近节点 j 将数据按照最短路径传输至自己的邻近节点, 一步一步传输的汇聚节点 c ; 下行数据的传输过程: 先按照最短路径将数据逐步传输到节点 i 的邻近节点 j , 再由临近节点 j 传输到节点 i 。无论上行数据的传输还是下行数据的传输, 均使用 δ_{jk0} 表示节点 j 到节点 k 之间的链路实时性数据的延时时间, 使用 δ_{jk1} 表示节点 j 到节点 k 之间的链路非实时性数据的延时时间。对于多跳变传输的 WMNs, 其延时的求法通常是计算最短链路上所有链路延时时间的总和。 $D_{u0}(i)$ 、 $D_{u1}(i)$ 、 $D_{d0}(i)$ 以及 $D_{d1}(i)$ 计算表示为式 (20) ~ (23):

$$D_{u0}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} \delta_{jk0} \quad (20)$$

$$D_{u1}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} \delta_{jk1} \quad (21)$$

$$D_{d0}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} \delta_{jk0} \quad (22)$$

$$D_{d1}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} \delta_{jk1} \quad (23)$$

无论是实时性数据链路延时时间 δ_{jk0} 还是非实时性数据链路的延时时间 δ_{jk1} 均由两部分组成: 一部分是队列中等待延时, 另一部分为数据的传输延时。分别用 q_{j0} 和 μ_{j0} 表示实时性数据的队列等待延时以及传输延时; 用 q_{j1} 和 μ_{j1} 表示非实时性数据的队列等待延时以及传输延时。 μ_{j0} 为实时性数据传输成功需要的时隙数与单个时隙所持续时间 τ 的乘积; μ_{j1} 为非实时性数据传输成功需要的时隙数与单个时隙所持续时间 τ 的乘积。如果节点 j 缓冲队列中实时性数据的传输或者重传的概率为 p_{r0} , 其在传输过程中发生碰撞的概率为 β_{j0}^k , 其获得成功传输的次数可以表示为 $p_{r0}(1 - \beta_{j0}^k)$, 节点 j 缓冲队列中实时性数据传输延时 μ_{j0} 可以表示为:

$$\mu_{j0} = \frac{1}{p_{r0}(1 - \beta_{j0}^k)} \tau \quad (24)$$

同理, 节点 j 缓冲队列中非实时性数据的传输延时 μ_{j1} 可以表示为:

$$\mu_{j1} = \frac{1}{p_{r1}(1 - \beta_{j1}^k)} \tau \quad (25)$$

节点 j 实时性数据的平均延时 q_{j0} 与其缓冲队列中存在实时性数据的平均数据包相关:

$$q_{j0} = \sum_{k \in \Gamma(j)} \theta_{j0}(k) \mu_{j0} \quad (26)$$

式中: θ_{j0} 为节点 j 缓冲队列中实时性数据的平均数据包数量, 其与节点 j 传输开始时概率相关:

$$\theta_{j0} = \sum_{n_0=0}^{Z_0} n_0 \pi_B(j, n_0) \quad (27)$$

而其非实时性数据的平均延时和其缓冲队列中存在实时性数据和非实时性数据队列长度均密切相关,按照相同的方法,可以推导出非实时性数据在队列中的延时时间 q_{j1} 表示为:

$$q_{j1} = \sum_{k \in \Gamma(j)} \theta_{j1}(k) \mu_{jk1} \quad (28)$$

由于非实时性数据排在数据队列的后面,因此 θ_{j1} 不但与缓冲队列中非实时性数据的数量相关,而且与队列中实时性数据的数量相关,可以表示为:

$$\theta_{j1} = \sum_{n_0=0}^{z_0} \sum_{n_1=0}^{z_1} n_0 n_1 \pi_B(j, n_0, n_1) \quad (29)$$

$$D_{u0}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} \delta_{jk0} = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} (q_{j0} + \mu_{jk0}) = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} \left(\left(\sum_{p \in \Gamma(j)} \theta_{j0}(p) \mu_{jk0} \frac{1}{p_{r0}(1 - \beta_{j0}^k)} \tau \right) + \frac{1}{p_{r0}(1 - \beta_{j0}^k)} \tau \right) \quad (32)$$

$$D_{d0}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} \delta_{jk0} = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} (q_{j0} + \mu_{jk0}) = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} \left(\left(\sum_{p \in \Gamma(j)} \theta_{j0}(p) \mu_{jk0} \frac{1}{p_{r0}(1 - \beta_{j0}^k)} \tau \right) + \frac{1}{p_{r0}(1 - \beta_{j0}^k)} \tau \right) \quad (33)$$

$$D_{u1}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} \delta_{jk1} = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} (q_{j1} + \mu_{jk1}) = \sum_{j,k \in \Omega_u(i)} \left(\left(\sum_{p \in \Gamma(j)} \theta_{j1}(p) \mu_{jk1} \frac{1}{p_{r1}(1 - \beta_{j1}^k)} \tau \right) + \frac{1}{p_{r1}(1 - \beta_{j1}^k)} \tau \right) \quad (34)$$

$$D_{d1}(i) = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} \delta_{jk1} = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} (q_{j1} + \mu_{jk1}) = \sum_{j,k \in \Omega_d(i)} \left(\left(\sum_{p \in \Gamma(j)} \theta_{j1}(p) \mu_{jk1} \frac{1}{p_{r1}(1 - \beta_{j1}^k)} \tau \right) + \frac{1}{p_{r1}(1 - \beta_{j1}^k)} \tau \right) \quad (35)$$

3 智能配电网 WMNs 性能分析

3.1 仿真环境与试验参数设置

由参考文献[21]可知,在智能配电网中,虽然智能仪表的数量较多,但是数据采样的周期较长,而实时性数据对传输的延时有要求,但是数量较少,为增加对比性,在仿真系统中,假定所设计的无线传感器网络中由 2 个数据采集器,16 个路由器,6 033 个智能仪表组成。由于实时性数据优先级别高于非实时性数据(处于缓冲队列前端),设实时性数据传输或重传的概率为 0.8,非实时性数据传输或重传的概率为 0.5。智能仪表所传输的半径为 150 m,路由器和数据采集器传输的距离为 1 500 m。节点内数据缓冲队列的长度为 20,其中实时数据的长度为 5,非实时性数据的长度为 15,最大的循环迭代次数 M 设置为 200 次。

测试环境包括 3 种情况:

1) 保持上行数据中实时性数据产生的时间间隔为 $1/\lambda_{u0} = 0.125$ h,非实时性数据产生的时间间隔为 $1/\lambda_{u1} = 0.25$ h;下行的实时性数据和非实时性数据产生的时间间隔 $1/\lambda_{d0}$ 和 $1/\lambda_{d1}$ 分别从 0.5 h 逐步增加到 4 h。在此过程中,规定节点内数据缓冲队列中保持实时数据的长度为 5,非实时性数据的长度为 15。

2) 保持下行数据中实时性数据产生的时间间隔为 $1/\lambda_{d0} = 0.25$ h,非实时性数据产生的时间间隔为 $1/\lambda_{d1} = 0.5$ h;上行的实时性数据和非实时性数据产生的时间间隔 $1/\lambda_{u0}$ 和 $1/\lambda_{u1}$ 分别从 0.125 h 逐步增加到 1 h。在此

根据式(26)~(29)可知, $\theta_{j0}(k)$ 只是 θ_{j0} 的一部分, $\theta_{j1}(k)$ 也只是 θ_{j1} 的一部分,可表示为式(30)和(31):

$$\theta_{j0}(k) = \alpha_j(k) \theta_{j0} \quad (30)$$

$$\theta_{j1}(k) = \alpha_j(k) \theta_{j1} \quad (31)$$

将式(24)、(26)、(30)分别代入式(20)和(22)可以得到实时性数据的上行数据和下行数据的平均延时时间,将式(25)、(27)、(31)分别代入式(21)和(23)可以得到非实时性数据的上行数据和下行数据的平均延时时间,得式(32)~(35):

过程中,规定节点内数据缓冲队列中保持实时数据的长度为 5,非实时性数据的长度为 15。

3) 保持上行数据中实时性和非实时性数据产生的时间间隔分别为 $1/\lambda_{u0} = 0.125$ h 和 $1/\lambda_{u1} = 0.25$ h;下行数据中实时性和非实时性数据产生的时间间隔分别为 $1/\lambda_{d0} = 0.5$ h 和 $1/\lambda_{d1} = 0.25$ h。节点缓冲队列长度从 5 增加到 20,其中实时性数据和非实时性数据单次分别增加 1 和 4,主要评估队列长度对延时时间的影响。为了评价所提出方案在传输时间的优越性,增加了与文献[21]的对比。

3.2 试验结果及 WMNs 性能分析

图 6 为环境(1)下的测试结果,对比图 6(a)和(b)可以看出,上行的实时性数据传输延时时间随着下行实时性、非实时性数据的增加,无论是增加的速度还是最终增加的数量都小于非实时性数据。

同时下行的实时性数据产生的时间间隔对上行的实时性、非实时性数据延时的影响均较大;而下行的非实时性数据时间间隔的增加,对上行的实时性数据影响程度没有对非实时性数据的影响程度大。这说明上行的实时性数据由于在节点队列中排在缓冲队列的前面,节点内具有优先传输的权利,这与第 2 章的分析完全吻合。同理对比图 6(c)和(d)同样可以看出,下行数据的实时性、非实时性数据,随着自身产生时间间隔的增加,具有与上行数据相似的变化规律。对比图 6(a)和(c)以及(b)和(d),可以看出,上行实时性数据的延时时间要小于下行实时性数据的延时时间,同样,上行的非实时性数据的延时时间也小于下行的非实时性数据的延时时间。

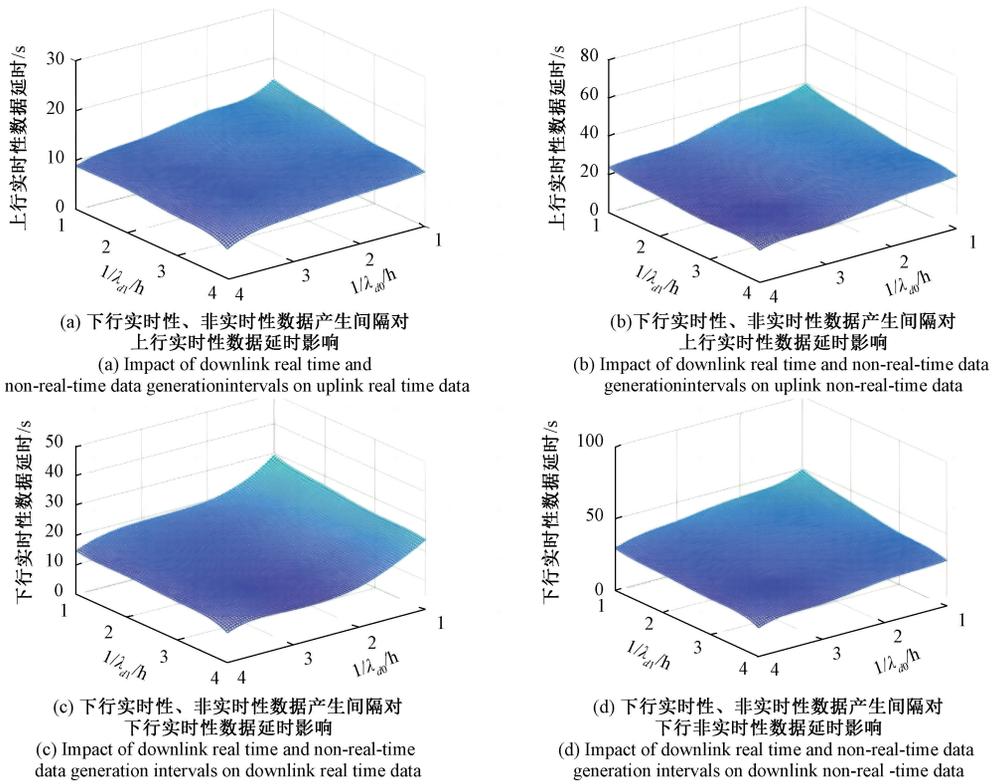


图 6 上、下行数据延时时间随下行数据产生时间间隔的变化

Fig. 6 The delay time change of uplink and downlink data with time interval of downlink data generation

图 7 为环境(2)下的测试结果,从图 7(a)可以看出,上行实时性数据的延时时间随着上行的实时性、非实时性数据产生的时间间隔增加,均呈现下降趋势。但是实时性数据产生的时间间隔增加,意味着实时性数据产生率下降,也就是网络中上行的实时性数据减少,上行实时性数据的传输更加顺畅,延时时间减少的速度、数量均超过非实时性数据时间间隔增加的影响。对比图 7(a)和(b),上行的非实时性延时时间随着上行实时性、非实时性数据产生的时间间隔增加,延时时间均快速减少。主要原因是,实时性数据在传输上具有优先权,非实时性数据随着产生时间间隔的增加,网络中的数据量会减少。因此,二者均会对非实时性数据传输产生影响。对比图 7(c)和(d)可以看出,随着上行数据产生的时间间隔增加,下行传输的实时性、非实时性数据传输延时时间均逐步减少,只是实时性数据延时时间减少的速度要快于非实时性数据。与上行数据的延时时间对比,下行数据的延时时间要大于上行数据的延时时间。

一般实时性数据,要求在点对点传输需要在 10 个时隙周期内完成传输,非实时性数据在 30 个时隙周期内传输完成。实时性数据在整个智能配电网通信网络通信时间需要在 50 s 内完成,非实时数据虽然对具体通信时间没有严格要求,一般需要在 300 s 完成。从图 6 和 7 的仿

真结果来看,无论是上行的实时性和非实时性数据的延时时间随着下行非实时性和实时性数据产生间隔的变化,还是下行的实时性数据和非实时性数据随着上行实时性数据产生间隔的变化,实时性数据通信完成的时间均低于 50 s,而非实时数据完成时间在 70 s 左右,远远低于 300 s,数据传输的实时性得到有效保障。

图 8 为环境(3)下的测试结果。从图 8(a)可以看出,随着节点队列长度的增加,上行实时性、非实时性数据的延时时间均进一步增加,但是非实时性数据的延时时间要大于实时性数据的延时时间。从图 8(b)可以看出,随着节点队列长度的增加,下行实时性、非实时性数据的延时时间的变化趋势与上行数据完全一致,只是下行数据的实时性、非实时性数据的延时时间均大于相应的上行数据的延时时间。图 8(c)为所提出的方案与文献[21]中上行数据随着节点队列长度增加延时时间变化情况的对比,可以看出二者变化的趋势基本一致,只是本文所提出方案的上行数据的延时时间要少于文献[21]。对比图 8(d)可以看出,所提方案下行数据传输延时也小于文献[21]。可见,本文所提方案的数据传输延时性能要优于文献[21]。对比图 8(c)和(d),还可以看出,下行数据的延时时间受队列长度的影响比上行数据大,延时时间要比上行数据更长。

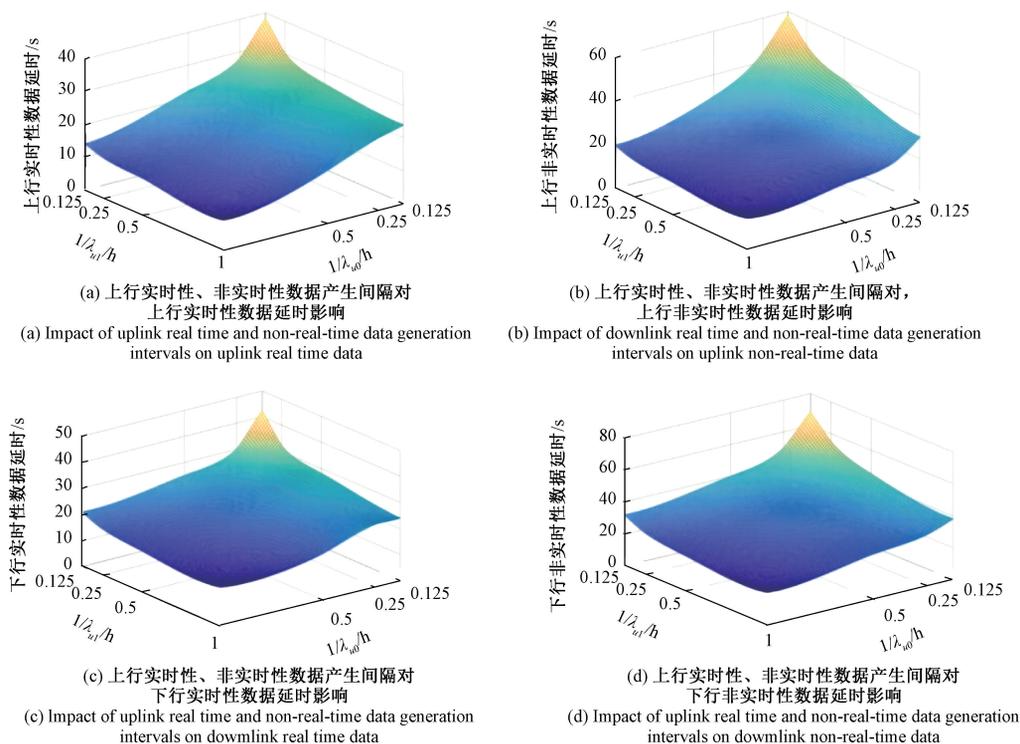


图 7 上、下行数据延时时间随上行数据产生时间间隔的变化

Fig. 7 The delay time change of uplink and downlink data with time interval of uplink data generation

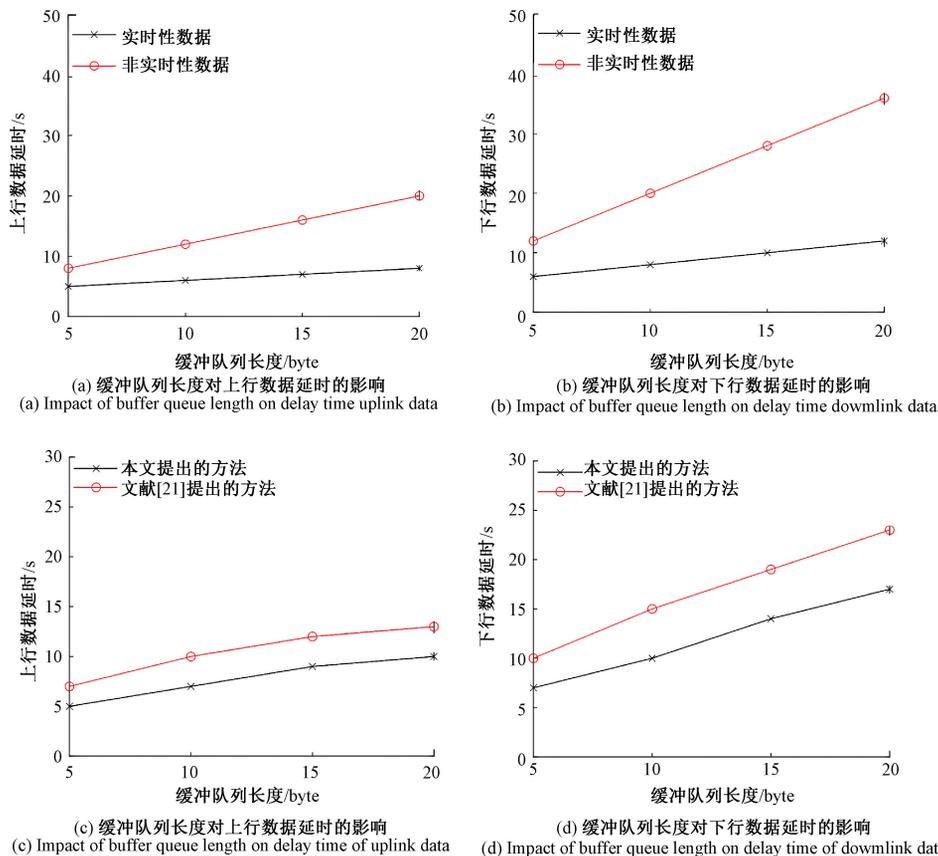


图 8 上、下行数据延时时间随缓冲队列长度变化

Fig. 8 The delay time change of uplink and downlink data with length of buffer queue

从图 8 的仿真结果,同样可以看出,实时性数据和非实时性数据的延时时间均小于相应的规定限值,数据传输的实时性得到保证。

4 结 论

针对智能电网中大规模终端智能仪表采集数据对传输的实时性需求不同,提出了一种 WSNs 网络延时性能分析评估方法。在节点内,按照优先级不同,建立起节点队列模型,保证实时性数据优先传输。以马尔科夫链调制为基础,建立起前后两个时隙之间传输延时关系,并进一步建立起稳态解求解的数据模型,从而实现智能配电网 WMNs 通信性能的评估。最后通过 3 种网络环境对所提出的方法进行评估分析,验证所提方法的正确性。

参考文献

- [1] 倪阳旦,卢东祁,喻谦,等. 基于 ESP-Mesh 网络的变电站物联信息汇聚[J]. 上海交通大学学报,2021,55(S2):60-63.
NI Y D, LU D Q, YU Q, et al. Internet of things information gathering of substation based on ESP-Mesh network[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021,55(S2):60-63.
- [2] 林佳颖,栾文鹏,余贻鑫,等. AMI 量测用于配电网在线状态估计的可信度建模及分析[J]. 电网技术,2018,42(4):1191-1200.
LIN J Y, LUAN W P, YU Y X, et al. Credibility modeling and analysis of AMI measurements for on-line distribution state estimation [J]. Power System Technology,2018,42(4):1191-1200.
- [3] 张晶,代攀,吴天京,等. 新一代智能电网技术标准体系架构设计及需求分析[J]. 电力系统自动化,2020,44(9):12-20.
ZHANG J, DAI P, WU T J, et al. Architecture design and demand analysis of new generation technical standard system for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(9):12-20.
- [4] PRIMADIANTO A, LU C N. A review on distribution system state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(5):3875-3883.
- [5] 陈晨,费丹,郑鹏,等. 5G TM 信号无线信道测量平台研究与实现[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(11):91-99.
CHEN CH, FEI D, ZHENG P, et al. Research and implement of wireless channel measurement platform based on 5G TM signal [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(11):91-99.
- [6] WANG H, HAN G, ZHANG W, et al. A probabilistic source location privacy protection scheme in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2019,68(6):5917-5927.
- [7] DHUNNA G S, AL-ANBAGI I. A low power WSNs attack detection and isolation mechanism for critical smart grid applications[J]. IEEE Sensors Journal,2019,19(13):5315-5324.
- [8] 方如举,王建平,孙伟. 无线传感器网络通信的拥塞控制策略[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(4):558-567.
FANG R J, WANG J P, SUN W. The congestion control strategy for WSNs communication [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(4):558-567.
- [9] 杨金金,刘洛琨,张剑,等. 基于干扰矩阵重构的稳健自适应波束形成算法[J]. 信息工程大学学报,2014,15(3):286-292.
YANG J J, LIU L K, ZHANG J, et al. Robust adaptive beam-forming algorithm based on interference covariance matrix reconstruction [J]. Journal of Information Engineering University,2014,15(3):286-292.
- [10] 张铮,汪杰,倪西学. 面向无人机数据采集的 LoRa 扩频因子预测模型研究 [J]. 仪器仪表学报,2023,44(10):294-302.
ZHANG ZH, WANG J, NI X X. Research on the LoRa spreading factor prediction model for UAV data collection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(10):294-302.
- [11] ATHANASIOS G, COTTIS P G. Exploiting the cellular infrastructure for data transmission in smart metering systems [J]. Journal of Computer & Communications, 2016,4(7):31-41.
- [12] PENG C, HUANG J. A home energy monitoring and control system based on ZigBee technology [J]. International Journal of Green Energy, 2016,13(15):1615-1623.
- [13] MITTAL N. Computational Intelligence based clustering algorithms for wireless sensor networks: trends and possible solutions [J]. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT), 2021,12(2):2992-3002.
- [14] 陈蕾,周明拓,章毅,等. 无线射频网状网在低压配电网中的应用研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2020,32(5):726-735.
CHEN L, ZHOU M T, ZHANG Y, et al. Application research of wireless RF-mesh network in low voltage distribution network[J]. Journal of Chongqing University

- of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 32(5) : 726-735.
- [15] MATSUO K, SAKAMOTO S, ODA T, et al. Performance analysis of WMNs by WMN-GA simulation system for two WMN architectures and different TCP congestion-avoidance algorithms and client distributions [J]. International Journal of Communication Networks & Distributed Systems, 2018, 20(3) : 335-351.
- [16] 鞠成安, 王妮娅, HANZALA, 等. 融合局部搜索策略求解 DCMST 的改进稳态遗传算法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2023, 35(5) : 935-942.
- JU CH AN, WANG N Y, HANZALA, et al. Improved steady-state genetic algorithm for DCMST with local search strategies [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Nature Science Edition), 2023, 35(5) : 935-942.
- [17] SYLIA M T, YASSINE M, ASMA B G, et al. Nodes placement in wireless mesh networks using optimization approaches: A survey [J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(7) : 5283-5319.
- [18] ESSA E, ASKER M A, SEDEEP F T. Investigation and performance optimization of mesh networking in ZigBee [J]. Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2020, 8(2) : 790-801.
- [19] SINGH A R, DEVARAJ D, BANU R N. An intelligent algorithm for joint routing and link scheduling in AMI with a wireless mesh network [J]. Studies in Computational Intelligence, 2019, 771 : 311-321.
- [20] DENG X H, HE T T, HE L F, et al. Performance analysis for IEEE 802. 11s wireless mesh network in smart grid [J]. Wireless Personal Communications, 2017, 96 (1) : 1537-1555.
- [21] MALANDRA F, SANZO B. A markov-modulated end-to-end delay analysis of large-scale RF mesh networks with time-slotted ALOHA and FHSS for smart grid applications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(11) : 7116-7127.
- [22] MALANDRA F, SANZO B. Performance evaluation of large-scale RF-mesh networks in a smart city context [J]. Mobile Networks & Applications, 2018, 23(4) : 912-920.
- [23] KIPPKE M A, ARBOLEYA P, SAYED I E. Advanced metering infrastructure for smart grid real-time energy management using mesh networks based in IEEE802. 15. 4 and 6LoWPAN [C]. 2021 IEEE Madrid Power Tech. Madrid, Spain, IEEE, 2021 : 1-6.
- [24] 方如举, 葛瑜, 孙伟, 等. 基于 WSNs 的智能配电网通信数据传输带宽的优化分配策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23) : 88-95.
- FANG R J, GE Y, SUN W, et al. Transmission bandwidth optimal allocation strategy of communication data for a smart distribution grid based on WSNs [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23) : 88-95.

作者简介



方如举, 教授, 2017 年于合肥工业大学电气工程学院获得博士学位, 现为许昌学院电气与机械工程学院副院长, 主要研究方向为智能电网无线传感器网络通信、电气智能控制以及分布式发电控制策略。

E-mail: fangruju@163.com

Fang Ruju, professor, received his Ph. D. degree from the School of Electrical Engineering, Hefei University of Technology in 2017. Now he is the deputy Dean of the School of Electrical and Mechanical Engineering, Xuchang University. His main research interests include smart grid wireless sensor network communication, electrical intelligent control and distributed power generation control strategy.



赵晗, 2018 年于华北水利水电大学获得学士学位, 现为华北水利水电大学电气工程学院研究生, 主要研究方向为电气智能控制以及分布式发电控制策略。

E-mail: Z20211050618@stu.ncwu.edu.cn

Zhao Han received her B. Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2018. Now she is a M. Sc. candidate in the School of Electrical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power. Her research interests include electrical intelligent control and distributed power generation control strategy.