

电力物联网建设环境下可充电无线传感器网络 能效与路由优化策略*

韦荣桃¹, 李舒², 张艳玲¹, 王进帅¹

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 广东电网有限责任公司梅州供电局, 广东 梅州 514021)

摘要: 电力物联网的建设可以全方位提高电力系统各个环节信息感知的深度和广度, 实时监测和掌控各环节重要设备的运行参数, 提升电力系统的分析、预警、自愈及灾害防范能力; 传感器件是对电力物联网各环节信息进行深度掌握最关键的环节, 然而, 复杂的工作环境增加了更换传感器件电池以及人工维护的难度, 网络节点供能成为制约电力物联网发展的关键问题; 针对此, 根据电力物联网建设形势下智能巡检的场景特点, 选择具备较强抗电磁环境干扰能力的磁共振充电方式, 设计了面向电力物联网的可充电无线传感器网络架构, 研究传感器节点的能量管理策略, 提出变电站智能巡检场景下可充电 WSN 的负载均衡路由优化算法, 并通过仿真验证在可充电条件下提升无线传感器网络工作寿命的有效性, 解决传感器节点能量受限的难题, 从而提升传感网络的可靠性和稳定性, 为电力智能巡检的开展创造有利条件。

关键词: 电力物联网; 可充电无线传感网; 变电站智能检测; 负载均衡; 路由优化

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2019.022.006

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2019)22-0031-06

Energy efficiency and route optimization strategy for rechargeable wireless sensor networks in power grid construction environment

Wei Rongtao¹, Li Shu², Zhang Yanling¹, Wang Jinshuai¹

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China.

2. Meizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Meizhou 514021, Guangdong, China)

Abstract: The construction of the power internet of things can improve the depth and breadth of information perception in all aspects of the power system, monitor and control the operational parameters of important equipment of each link in real time, and improve the analysis, early warning, self-healing and disaster prevention capabilities of the power system. The most critical part of the in-depth understanding of the information in the various aspects of the power of the Internet of Things, however, the complex working environment increases the difficulty of replacing the sensor battery and manual maintenance, and the power supply of the network node becomes a key issue restricting the development of the power Internet of Things; According to the scene characteristics of intelligent inspection under the situation of power Internet construction, this paper selects the magnetic resonance charging method with strong anti-electromagnetic interference capability, designs the rechargeable wireless sensor network architecture for power internet of things, and studies the energy of sensor nodes. The management strategy proposes a load-balancing routing optimization algorithm for the rechargeable WSN in the substation intelligent inspection scenario, and simulates the effectiveness of improving the working life of the wireless sensor network under the chargeable condition, and solves the problem of energy limitation the sensor node, thereby improving sensing network reliability and stability, which creates favorable conditions for the development of electric power intelligent inspection.

Keywords: power internet of things, rechargeable wireless sensor network, substation intelligent detection, load balancing, route optimization

* 基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目(031400KK52160008)

0 引言

智能电网的发展使得电力设备变得更加智能化和现代化,从而促使智能电网与物联网产生融合发展趋势^[1]。所谓的电力物联网,就是能够满足电网基础设施、人员和环境识别、互联、感知和控制要求的网络系统^[2]。而传感器是实施电力物联网中最基本的设施,电力物联网监测输变电设备运行状况及变电站、输电线周围环境的变化需要依赖大量环境监测传感器来构成无线传感器网络,实时监测和掌控各环节重要设备的运行参数,以提升电力系统的分析、预警、自愈及灾害防范能力,提升电网的安全运行水平^[3]。

但是常规的传感器一般依靠自备的电池供电,且中高压电气设备工作环境复杂,难以人工维护和更换电池,无法保证传感器节点长期稳定的工作^[4]。目前一般通过研究传感器网络的路由、能量分配与管理的优化来提升能效。如文献[5]提出一种配电无线传感网能量均衡路由算法以解决节点能量消耗不均引起能量空洞所导致的低能效;文献[6]提出一种基于LEACH的改进路由算法以选择更合理的簇头节点。这些方法可以使节点能量尽可能地得到充分利用,但是无法从根本上解决问题。

因此,必须采用高效、稳定的供能方式对输变电物联网监测传感器进行供电。目前,一般采用无线传输方式实现对电子器件的电能的供应,最主要的传输方式包括电感耦合技术、电磁辐射技术以及磁耦合谐振技术等,虽然可以在一定距离内直接或间接地完成电能传输,但节点功能仍缺乏稳定性,功能效率较低。

在此情况下,选择具备较强抗电磁环境干扰能力的谐振式充电方式,研究其适用于电力物联网的高效充电策略;针对电力巡检场景下存在大量履带式机器人、可穿戴设备、单兵巡检装置等可移动设备的实际环境,以及考虑电力作业现场存在巡检车辆行动的情况,研究在节点可移动环境下,无线传感网络路由优化算法非常必要,可以降低节点能耗,提高供能效率,从而保障电力物联网安全稳定运行。

1 面向电力物联网的 WSN 节点充电方式选择与能量管理研究

1.1 电力物联网的特点与应用环境分析

电力物联网其根本特点为全面感知、可靠传送和智能处理。全面感知,即利用 RFID、传感器、二维码等技术实现对物体的信息进行实时感知、测量与捕获;可靠传送,通过将事物与通信网络互联,依靠各种通信技术,实时进行数据的有效共享与交互;智能处理,利用

现有的各种智能信息处理技术,对大量的电力数据进行分析处理,实现智能化的监测和管理^[7]。

与传统物联网相比较,电力物联网一般应用在输变电设备监测、变电站巡检等领域,由于中高压电气设备工作环境复杂,且电磁干扰严重,不利于人工维护,更换电池十分不便。而电力物联网对于通信的需求很高,要求部署在电力系统中的各传感器节点可靠长久的运行。可充电无线传感网的应用则可以很好地解决制约电力物联网传感器节点电源供给的难题。

1.2 针对输变电等应用场景的 WSN 充电方式选择

在电力物联网中,中高压电气设备工作环境的复杂性,制约某些监测传感器的电能供给,造成电力设备的安全隐患。由于工作环境复杂,取电不方便,人工维护、更换电池十分麻烦,因此必须采用合适的供能方式对输变电物联网监测传感器进行供电^[8]。

无线充电技术是在当前无线电能传输技术的基础上发展起来的,利用无线传输这种方式在一定距离内直接或间接地完成电能传输,以实现电子器件的电能供应。目前,无线能量传输方式多种多样,其中最主要包括:

(1)电磁辐射技术是通过电磁波在空气中传输电能。要求传输双方不能有阻挡,传输功率较低;

(2)电感耦合技术的原理是电磁感应,即通过两个线圈相互耦合产生感应电流来传输电能。这种方式有效传输距离较短,需要传输双方精确对准;

(3)磁耦合谐振技术是通过处于磁场内部的两个线圈共振效应来完成电能传输,且对外界不会产生影响。可以实现中距离的无线充电,无需对准,不受环境影响。

以上所述的三种无线充电技术的实现方式,其特点各不相同,可适应于各种有无线充电需求的场景。

变电站工作环境复杂,电磁场干扰较大,需要较高功率的电能供应和安全可靠的供应方式,且不能对周围设备造成影响。

鉴于目前磁共振的方式具有原理简单、传输的效率高、传输的距离理想、障碍物阻挡影响有限、对外界没有影响等优势,在面向电力物联网的可充电无线传感器网络应用方面,文章选择采用磁共振方式来实现较短距离内对电能的传输,节点天线接收的是电磁波。

1.3 基于磁共振充电方式的可充电 WSN 能量管理策略

将电力物联网可充电 WSN 应用在变电站场景下,选择采用磁共振的充电方式对传感器节点进行电能补给^[9]。在此基础上建立实现在相对较远的距离以较高效率完成

无线能量传输的充电模型:

$$E_i = \begin{cases} \eta P_r(d) \tau_i, & d \leq R_w \\ 0, & d > R_w \end{cases} \quad (1)$$

式中 η 为充电效率; $P_r(d)$ 是节点所能接收到的充电功率; d 是节点与充电设施两者之间的距离; τ_i 是节点的充电时间; R_w 是传感器节点与充电设施之间能达到的最大充电距离。

只有在监测节点在充电设施可达到的能量传输范围之内,节点才能够接收到充电站发射的能量,并对自身配备的电池进行充电,此时的充电效率同两者距离平方成反比关系。当节点不在电能传输半径之内时,则充电效率为零。计算无线充电效率的公式为 $\eta = 1 - 0.0377 \times d - 0.0958 \times d^2$, 其中 d 是传感器节点与充电站之间的距离。

变换上式得充电功率为:

$$P_r(d) = \begin{cases} \frac{\alpha}{(\alpha + \beta)_i^2}, & d \leq R_w \\ 0, & d > R_w \end{cases} \quad (2)$$

式中 α 与 β 是常量,其数值由传感器节点、充电站节点与输电线路监测区域环境等条件决定。

在一阶无线通信模型下,在两个间隔距离为 d 的节点进行通信时,每传输 1 kbit 信息的能耗是^[10]:

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} kE_{elec} + k_i \varepsilon_{fs} d^2, & d \leq d_0 \\ kE_{elec} + k_i \varepsilon_{mp} d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (3)$$

节点接收 k 比特数据消耗的能量为:

$$E_{RX}(k) = kE_{elec} \quad (4)$$

式中 E_{elec} 代表发送、接收电路所耗费的能量; d 表示两节点之间的通信距离; ε_{fs} 及 ε_{mp} 代表信道模型的衰减、放大系数; d_0 为阈值系数, $d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}}$ 。

综合以上基于磁共振充电方式的传感器节点能量管理策略,可以进一步设计出合理的路由优化算法来实现传感器节点负载均衡,进而提高整个无线传感网络的可靠性和生命周期。

2 变电站智能巡检场景下可充电 WSN 的路由优化

变电站的智能巡检对提高输变电的安全性和可靠性,保障输电设备的正常运行起着重要的作用。变电站场景下电磁干扰严重,电气设备工作环境复杂,传感网络工作的能效和可靠性受到考验。要达到节点能量高效利用和补给,提升传感网络工作寿命和可靠性的效果,需要对可充电无线传感网的路由算法进行优化。

面向变电站智能巡检场景下的无线充电传感器网络中的负载均衡路由算法(LBRWSN, Load Balanced

Routing in Wireless Rechargeable Sensor Network) 包括簇的建立和稳定维护。通过此路由算法使簇内节点能量均衡消耗,保证节点的存活率,以达到提高传感网络寿命的目的。

2.1 变电站内无线传感网簇的建立

(1) 变电站内可充电传感节点分簇

变电站内巡检包括各类仪表数据的采集,隔离开关刀闸状态的检测,变压器、发电机等设备的状态监测。通过对各设备的监测传感器节点进行分簇可以便于节点的高效利用和管理^[11]。

分簇的完成是在以下假设条件的基础上实现的:

(1) 被监测变电站范围内的所有节点对于自身所处的方位信息是已知的; (2) 被监测变电站 S 范围内的全部节点对其监测范围的方位信息是已知的。通过分析被监测变电站内各节点的方位及其通信可达范围,可以将变电站内个设备的监测传感器节点分为若干个簇,每个簇内的传感器节点则根据下面要提到的规则来决定簇头,簇头负责将其簇内所包含的节点所收集的设设备状态数据集中起来,在经过融合处理后直接传送或者经过监测范围内其他簇头节点接力传送到 Sink 节点。假设在节点监测范围之中,产生了 16 个边长 a 的正方形区域,而每个区域里的传感器节点都构成一个虚拟簇,虚拟簇中的节点负责收集设备状态数据再传递到簇内的簇头,为了保证其中任意一个节点都能够把所收集的环境数据传递到簇头节点,要求虚拟簇边长 a 与簇内节点通信距离 R 的关系是: $a = \frac{2}{\sqrt{2}}R$ 。算法流程如图 1 所示。

(2) 基于各类传感器节点间能量均衡的簇头选择

为了保证变电站内实时检测信息的稳定采集和处理,使传感网节点能量相对均衡,需要找出簇内稳定度最高的传感器节点做为簇头。节点稳定度与节点剩余能量及节点的相对运动速度有关,我们引入权重指数来表示节点剩余能量及节点相对运动速度对节点稳定度的贡献。节点稳定度的定义为:

$$S = w_1 \times E + w_2 \times R + w_3 \times L \quad (5)$$

式中 $w_1 > w_2, w_1 + w_2 = 1$ 。

簇头节点将该簇内所有普通节点发送的变电站设备状态数据收集起来,并在对这些状态数据完成融合处理后传递给汇聚节点(Sink Node)。因此簇头节点的电能损耗会相对较快。为了保证传感器节点间能量均衡,将网络的存活时间延长到最大限度,所以簇头节点需按时进行更换,在簇头节点更

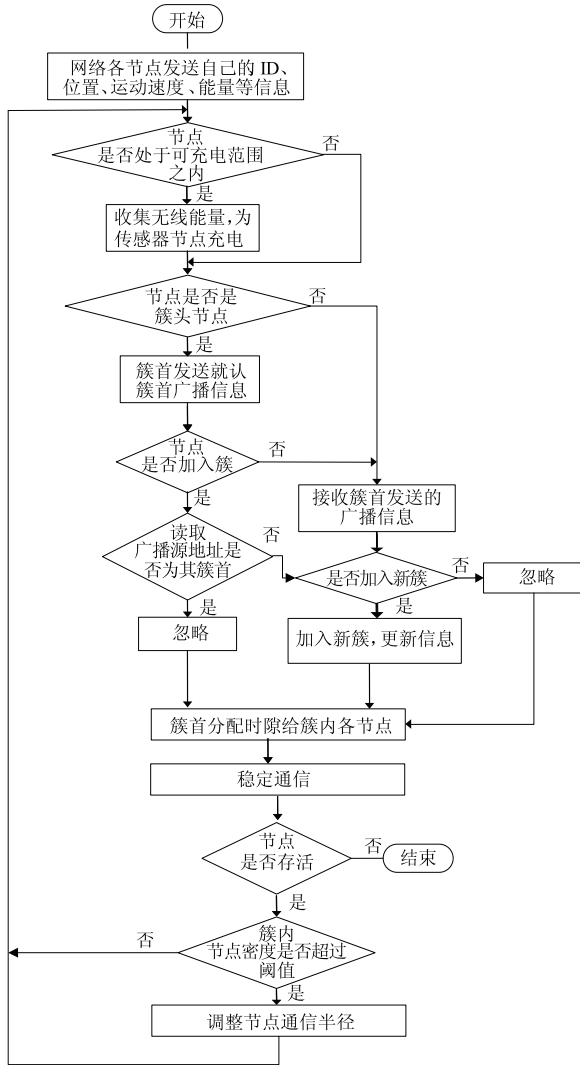


图 1 分簇算法流程图

Fig. 1 Clustering algorithm flow chart

换的过程里,考虑了两方面因素:(1)传感器节点的剩余能量 E ,如果节点电池所余下的能量越多,则其被选作簇头的可能性会更高;(2)传感器节点的运动速度 R ,在传感网中,节点一般是可移动的,当簇头运行时,其有可能进入到其他虚拟簇范围,造成本簇内节点距离簇首节点距离增大,造成能量消耗加大,更恶劣的情况造成数据丢失。所以考虑将节点运动速度作为一个因素, R 取负值,节点运动速度 R 越大,其被选为簇首节点的可能性越低。

节点剩余能量 E 的定义为:

$$E = \frac{\text{Energy_residual}}{\text{Energy_average}} \quad (6)$$

式中 Energy_residual 为某一节点内所余下的能量; Energy_average 为本簇内全部节点的平均能量。

节点运动速度 R 的定义为:

$$R = -\frac{V_c}{V_{\text{MAX}}} \quad (7)$$

式中 V_c 表示某一节点当前的运动速度; V_{MAX} 则表示该节点所能达到的最大移动速度。

$$L = 1 - \frac{d_i^2}{(d_{\text{max}} - d_i)^2} \quad (8)$$

式中 d_{max} 表示监测区域内节点同 Sink 节点间的最大距离; d_i 表示监测区域内某一节点 i 与 Sink 节点间的距离。此项是监测范围内节点 i 同 Sink 节点之间的距离项,如果节点距离 Sink 节点越近,则它通过无线传输所获取的能量就更多,此外,同 Sink 节点之间的距离越近,则其和 Sink 节点通信时所损耗的能量就更小,所以此项作用是为了选择同 Sink 节点之间距离最近的节点来作为簇头节点。

(3) 节点入簇

相邻簇间可能会产生信号重叠,处于重叠区域内的节点就可能接收到多个不同簇头所发送的广播信息,节点在收到第一个簇头所发送的广播信息后,就加入该簇,这之后如果该节点还能够接收到其他簇头所发送的广播信息,将会比较这个节点与不同簇头之间的距离,如果新簇头的距离与该节点更近,此节点就会加入进新簇,反之,忽略该簇头广播消息。

2.2 变电站内无线传感网簇的稳定和维护

(1) 变电站环境下无线传感网的稳定通信

网络在完成分簇及重叠区域节点入簇后,网络会进行到稳定的通信过程,传感器节点将变电站设备的状态检测数据收集起来,然后传递到簇头,簇头在完成对所收集的状态数据融合处理之后,将其传递给 Sink 节点;

(2) 最小化传感器损耗的簇首轮换

为了提高无线传感器网络的生存时长,算法中不会频繁地进行簇首轮换,而是在簇首节点检测到网络状态发生变化后再进行簇首轮换,如此以来可以在一定程度上降低簇首轮换过程中,由于节点首发消息所造成能量的损耗;

(3) 传感器节点通信半径的调整

由于变电站检测范围内节点分布具有的随机性,造成某些簇内节点数量较多,而某些簇内节点数量较少的情况。如果在一个簇内其节点密度越大,则其所损耗的能量也会更高,为了延长簇头节点的工作寿命,将动态调整簇头的通信半径,在簇头密度较大时,超过一定的阈值,则适当减少通信半径,减少电能消耗,实

现负载均衡,以达到提高网络存活时长的目的。调整前后的通信半径之间的关系如下:

$$R_c = (1 - Q_i) \times R \quad (8)$$

式中 R_c 代表调整后的通信半径; R 表示调整前的通信半径; Q_i 为传感器节点 i 的节点密度。 Q_i 的表达式为:

$$Q_i = \frac{N_{\text{neighbor}_i}}{N_{\text{wsn_alive}}} \quad (9)$$

式中 N_{neighbor_i} 代表传感器节点 i 的相邻节点数量; $N_{\text{wsn_alive}}$ 则为 WSN 监测网络内存活的传感器节点数量。

3 仿真分析

使用 Matlab 仿真软件实现对所提出的 LBRWSN 协议与 LEACH 路由协议性能的仿真分析比较。假定变电站中所有传感器节点都是可充电节点,充电设施能够通过磁耦合谐振技术为范围内节点进行无线充电。 N 个可充电节点被无规律地布设在变电站检测范围中,可充电节点可以以一定的速度来移动,充电设备则被固定在其位置上,可以为其充电半径以内的所有节点进行充电。

3.1 面向变电站智能巡检的可充电无线传感器网络模型建立

面向变电站智能巡检的可充电无线传感网络模型满足以下条件:

(1) 传感网的监测范围被设置为正方形,在监控范围内无规律地布设若干个无线传感器可充电节点;

(2) 变电站内每一个监测节点都拥有唯一 ID 号,监测节点可以根据 RSSI 获取本节点内所余下的能量、所处位置、以及距离汇聚节点长度的信息;

(3) 变电站内的每一个监测节点都内置磁耦合线圈,用于收集充电站的无线能量;

(4) Sink 节点初始能量为 5 J,位置固定,充电设备位置固定;

(5) 仿真中,传感网的监测范围被设置成 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的正方形内,在监控范围内无规律地布设 400 个无线传感器可充电节点,将网络的 Sink 节点设置在右上角位置,即(200,200)位置,在监测范围内布设 4 个充电设备,位置设在(50,50), (150,50), (50,150), (150,150),位置固定,不能运动;

(6) 仿真的无线传感器网络中所有节点所具有的初始化能量都相同,设成 1 J,无线传感器网络中所有节点均可以移动,且其能达到的最大运动速度 V_{max} 为 2 m/s,节点的实际移动速度 V_r 从 0 ~ V_{max} 里取随机值。节点间通信的数据包长度 5 kbit,控制包长 150 bit,充电站无线充电半径为 4 m,节点进行数据融合的能量消

耗为 4 nJ/bit。发送、接收电路所耗费的能量 E_{elec} 为 50 nJ/bit,信道模型的衰减、放大系数 ε_{fs} 和 ε_{mp} 分别为 10 pJ/bit/m² 和 0.001 3 pJ/bit/m⁴,常量 α 与 β 分别设置为 0.2 和 2.0,调整前节点通信半径 R 为 10 m。

3.2 仿真结果分析

图 2 为传感网中存活节点数量同网络运行轮次之间的关系图。其内给出了在网络规模达到 400 个节点时,无线传感器网络中存活节点数量的变化曲线图。文中所提出的算法 LBRWSN 可以有效延迟网络首个节点死亡的出现,保证网络中有足够的存活节点,完成相关的监测任务。LBRWSN 性能的提高得益于网络引入了充电设施对附近的传感器节点进行充电,及算法中同时引入了节点通信半径调整及改进的簇头选举机制。

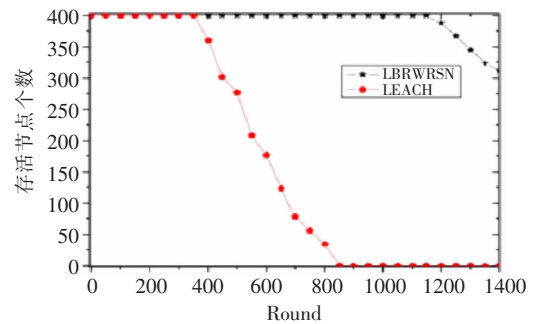


图 2 网络存活节点数量与网络运行轮次关系图
Fig. 2 Relationship diagram between number of network surviving nodes and network running rounds

图 3 为节点平均能量损耗与网络运行轮次关系图,其中给出了无线传感器网络在运行过程中节点的平均剩余能量曲线。从图中可以看出,通过使用提出的 LBRWSN 算法,其节点的平均能耗相对于 LEACH 算法有一定程度的降低,可有效提高变电站内可充电无线传感网络的生命周期。

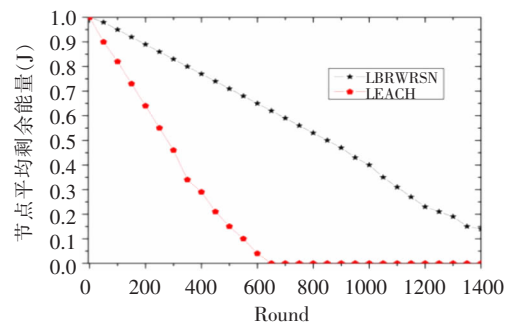


图 3 节点平均能耗与网络运行轮次关系图
Fig. 3 Relationship diagram between node average energy consumption and network operation round

4 结束语

电力物联网随着智能电网的不断发展应运而生,而传感器是电力物联网建设的基础,复杂的电力设备工作环境使网络中海量传感器的节点供能成为重要问题。文章首先分析电力物联网的工作环境及特点,总结电力物联网建设中现有 WSN 的局限性;然后面向电力系统环境选择合适的充电方式,研究基于磁共振充电方式的可充电 WSN 能量管理策略;在变电站智能巡检的场景下设计了适用于可充电无线传感器网络的负载均衡分簇路由算法;最后通过 matlab 仿真验证了此路由优化算法的效果,达到了降低节点平均电能损耗,最大限度地提升无线传感网稳定运行时长的目标,保障了无线传感网的安全稳定运行,对电力物联网发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 胡雯,孙云莲,杨成月,等. 基于物联网的智能电网信息化建设研究[J]. 电力信息化, 2013, 11(4): 51-54.
- [2] 王继业. 物联网及可视化技术在新一代智能变电站中的应用[J]. 电气应用, 2013, 32(19): 68-72.
- [3] 谢善益,杨强,王彬,等. 开放式输变电设备状态监测信息平台设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 125-130.
- [4] 赵建青,姚瑶,邱玩辉,等. 基于输电线路在线巡视系统的智能预警系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 49-54.
- [5] 凌咸庆. 电力无线传感网路由优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [6] 魏夏. 电力无线传感网分簇路由优化算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [7] 刘成. WSN 中基于 LEACH 协议的簇头选举策略及路由算法的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.
- [8] 吕杨. 无线可充电传感器网络充电规划研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [9] 赵勤学,杨俊杰,楼志斌. 智能变电站安全在线监测系统设计[J]. 电测与仪表, 2016, 54(7): 34-40.

[10] 蔡骥然,郑永康,周振宇,等. 智能变电站二次设备状态监测研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 148-154.

[11] 谢小军,于浩,陶磊,等. 可充电无线传感网络能量均衡路由算法[J]. 计算机应用, 2017, 37(6): 1545-1549.

作者简介:



韦荣桃(1994—),女,通信作者,硕士研究生,研究方向为信息与通信工程。Email:1165700788@qq.com



李舒(1983—),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向为电力系统通信及信息安全。
Email:gengqiang@tju.edu.cn



张艳玲(1994—),女,硕士研究生,研究方向为信息与通信工程。Email:zhangyanling8986@163.com



王进帅(1992—),男,硕士研究生,研究方向为信息与通信工程。Email:1053349427@qq.com

收稿日期:2018-08-20;修回日期:2018-12-03
(杜景飞 编发)