Energy Sustainable Wireless Information and Power Transfer Sensor Networks: Opportunities and Challenges*

GUO Xinming[1*], LIN Deyu[2], CHEN Wei[1]
(1.School of Computer, Xianyang Normal University, Xianyang Shaanxi 712000, China;
2.School of Software, Nanchang University, Nanchang Jiangxi 330047, China)

Abstract: As one of the key techniques at the perception layer of the Internet of Things (IoT), Wireless Sensor Networks (WSNs) have attracted extensive attention with the increasing popularity of applications in IoT. It is of great significance for the theory development and technological progress in IoT to present a scientific and detailed review on the techniques of energy sustainability in WSNs. However, most of the existing reviews only focus on the energy efficiency of the traditional WSNs. None of them pays attention to the energy sustainability technique based on the technology of the Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT). To this end, a detailed survey on techniques of the energy sustainability in WSNs is presented at length. All of the existing techniques of energy sustainability are divided into three categories, i.e., passive energy-saving technique, renewable energy harvesting technique, and SWIPT-based energy supply technique. Subsequently, based on the technique of SWIPT, a conceptual model of Energy Sustainable Wireless Information and Power transfer Sensor Networks (ESWIPSN) is proposed. It is analyzed and discussed at length from the perspective of the network protocol architecture and the energy management aspect respectively. In addition, the opportunities for ESWIPSN are elaborated and the potential challenges it faced are also pointed out. Finally, the conclusion is drawn and the possible research directions of ESWIPSN in the future are predicted and analyzed.

Key words: wireless sensor networks; simultaneous wireless information and power transfer; energy sustainability; energy efficiency
EEACC: 6150P; 7230; 6210C **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2023.08.001

数能一体化能量自治无线传感器网络:机遇与挑战*

郭新明[1*], 林德钰[2], 陈 伟[1]
(1.咸阳师范学院计算机学院, 陕西 咸阳 712000; 2.南昌大学软件学院, 江西 南昌 330047)

摘 要: 作为物联网感知层的关键技术之一, 无线传感器网络随着物联网应用的日益普及而备受关注。科学地对现存无线传感器网络能量自治技术进行梳理与综述, 对物联网理论发展与技术进步意义重大。然而, 学术界目前大多数综述只聚焦于传统无线传感器网络节能技术, 缺乏基于数能一体化传输技术的 WSNs 能量自治研究的相关阐述。为此, 首先详细综述了现存的无线传感器网络能量自治技术, 并按照能量自治手段的差异, 将其分为被动式节能技术、可再生能源收割技术以及数能一体化传输供能技术三类。随后, 基于数能一体化传输技术提出了数能一体化能量自治无线传感器网络概念模型, 并从网络协议体系以及能量管理层面对其进行了详细分析与论述。此外, 阐述了数能一体化能量自治无线传感器网络存在的机遇, 同时指出了其面临的挑战。最后, 进行了总结并对数能一体化能量自治无线传感器网络未来可行研究方向进行了预判与分析。

关键词: 无线传感器网络; 数能一体化传输; 能量自治; 能量效率
中图分类号: TP393 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2023)08-1171-13

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)是一种由数量巨大、价格低廉、体积微小的无线传感器节点密切配合完成复杂任务的无线自组织网络[1]。WSNs 具有部署简单、成本低廉等诸多优势, 因而被广泛应用于环境检测、军事监测、医疗护理、濒危物种监护以及灾后安全救援等领域[1-2]。无线传感器网络技术是物联网感知层的关键技术之一, 对物联网技术发展及其应用普及意义至关重要。同时, 物联网技术的广泛应用离不开无线传感器网络的大规模部署。2020 年全球新冠肺炎爆发, 物联网因其免接触式智慧诊断功能在世界范围内获得了更多的关注[3]。随着数字化时代的来临, 物联网规模正进一步扩大。据爱立信公司预测, 到 2023 年全球物联网设备数量将有望超过 200 亿台[4]。因此,

项目来源: 国家自然科学基金面上资助项目(61762061); 陕西省重点研发计划项目(2020NY-175); 陕西省教育厅服务地方项目(19JC041); 咸阳师范学院"学术带头人"资助项目(XSYXSDT202124); 江西省自然科学基金资助项目(20224BAB212016)
收稿日期: 2022-05-06 **修改日期**: 2022-08-03

无线传感器网络的部署规模将随之进一步扩大。

无线传感器网络大规模部署在一定程度上导致了全球能量消耗的上升,由此引发了严重的二氧化碳排放问题。据统计,由信息通信技术(Information Communication Technology,ICT)产生的二氧化碳排放目前已占到全球排放总量的 5%,其中 50%是由无线传感器网络产生的[5-6]。为缓解能源日益枯竭问题与保护生态环境,低碳经济已成为世界各国的普遍共识,也是我国新时代发展的基本战略抉择[7]。2021 年全国两会,“碳中和”首次被写进国务院政府工作报告[8]。因此,对 WSNs 数据感知与传输的低能耗要求不但与我国新时代经济发展模式高度契合,更迎合了当前学术界绿色网络技术的发展目标[9]。此外,无线传感器节点自身存在能量受限的缺陷。例如,采用一节 AA 电池供能的传感器节点只能连续工作 4 天[5,10]。同时,无线传感器节点通常以密集铺设的方式大规模部署于恶劣甚至人迹罕至的环境中,进一步增加了其能量补给的难度。当能量耗尽的传感器节点数量达到一定比例时,将出现网络分区。网络分区严重影响数据感知与传输,导致其上层应用无法获得足够的有效数据。因此,如何实现 WSNs 能量自治是物联网应用广泛普及亟待解决的重大难题之一。近年来,出现了大量的致力于提高无线传感器网络能量效率的相关研究,并取得了较为显著的研究成果。科学地对这些研究与成果进行综述对于物联网理论发展及其技术进步意义重大。

目前,国内外专家学者对现有无线传感器网络能量自治的相关研究成果进行了较为详细的综述。例如,Aziz 等[11]对基于拓扑控制(Topology Control,TC)的网络生命周期最大化技术进行了详细综述。给出了拓扑控制的全新定义,在此基础上对现存的拓扑控制技术进行了归类,并对其未来发展趋势和潜在的研究方向进行了预测。然而,该综述的局限性在于其关于拓扑控制的分类界限不够明晰。例如,其中有些拓扑控制技术实际上隶属于分簇机制[12]。Han 等[13]对于媒体接入控制技术(Media Access Control,MAC)进行了跟踪与详细论述。具体地说,作者把 2002 年到 2011 年之间出现的所有 MAC 协议分成同步 MAC 协议、异步 MAC 协议、基于帧的 MAC 协议以及多信道 MAC 协议。然而,作者主要关注于通用 MAC 协议,而非致力于能量自治的节能 MAC 协议。此外,也没有关于提高能量效率技术的系统分析与阐述。Gu 等[14]对基于移动 Sink 节点的节能机制进行了总结。作者将相关研究分为不受控的移动模型、路径受限移动机制、位置受限移动机制以及空间不受限的移动机制四类技术,随后对这四类技术进行了详细的分析。然而,作者的关注点只在于基于移动 Sink 节点的节能技术。事实上,除了基于移动 Sink 节点的节能技术,还包括基于移动 Relay 的节能机制。Younis 等[15]分析了现存的分簇技术并对他们面临的挑战进行了详尽分析。然而,他们只追踪了 2006 年以前提出的分簇策略。Pantazis 等[16]对现存的节能路由技术进行了综述,将 2013 年之前出现的节能路由技术分成基于网络结构的技术、基于通信模型的技术、基于网络拓扑的技术以及可靠节能路由技术四类。然而,作者只关注网络层的相关节能技术,事实上还存在跨层节能路由技术。Yetgin 等[17]对现存的关于如何延长 WSNs 生命期的节能技术设计原则及其存在的缺陷进行了详尽的分析。相关的节能技术被划分为基于跨层设计的资源分配方案、机会传输方案/休眠-唤醒调度、路由/分簇算法、移动 Sink/Relay 技术、覆盖率与连通性/优化部署、数据采集/网络编码、数据相关分析、能量采集技术以及波束成形技术。尽管该综述对于 WSNs 能量自治技术具有较广的涵盖面,却忽视了近年来出现的基于压缩感知的节能技术,且没有考虑具备能量采集功能的 WSNs。此外,本文作者对 2002 年至 2019 年出现的 WSNs 能量自治技术做了一个较为详尽的综述,并将相关技术从网络协议栈、节能层次以及节能视角分别进行了详细介绍[18]。然而,该综述只关注了传统静态 WSNs 的节能技术。除了上述所列举的综述之外,还包括其他一些对现存 WSNs 能量自治技术的相关综述,这些综述对传统的静态 WSNs 能效问题进行了分析[19-21]。然而,他们都未能对具备能量采集技术的 WSNs 以及结合数能一体化传输技术的 WSNs 进行介绍,也未能就 WSNs 能量自治技术的未来发展趋势作出预测。

针对无线传感器网络能量自治问题,本文对 2002—2022 年以来出现的与其相关的主要技术进行了详细综述。按照是否其具备自供能功能及其能量来源,分为被动式节能技术、可再生能源收割技术以及数能一体化传输供能技术三类。随后,基于数能一体化传输技术提出了数能一体化能量自治无线传感器网络的概念模型。结合网络协议体系对该概念模型进行了详尽的分析与论述,并指出了其存在的机遇与面临的挑战。最后,对本文进行了总结,并结合其面临的挑战指明了未来可行的研究方向。

1　现存能量自治技术综述

为实现无线传感器网络能量自治,近年来国内外各科研院所及专家学者进行了不懈的探索与努力,并取得了重要的科研成果。本节按照传感器节点能否进行后续供能及其能量来源,将现存的能量自治技术分为被动式节能技术、可再生能量收割技术以及数能一体化传输供能技术三大类。

1.1　被动式节能技术

被动式节能技术基于如下事实:所有无线传感器节点一经铺设便无法更换电池,亦无法以传统充电的方式获得能量补给。根据本文作者及其他学者关于最大化 WSNs 网络生命期的相关研究,被动式节能技术主要通过提高网络能量效率的方式来延长网络生命期。考虑到通信开销是无线传感器节点的主要能耗以及无线传感器网络中存在固有的“热点问题”,被动式节能技术主要通过降低节点通信能耗与均衡网络全局能耗的方式提高网络能量效率,以延长网络生命期[10]。

根据节能所聚焦的网络协议栈层次、节能级别以及节能视角,被动式节能技术可分为不同的类别[10]。具体地说,近年来出现的相关研究成果主要可分为节能媒介接入控制(Energy-Efficient Media Access Control,EEMAC)、移动节点辅助节能机制(Mobile Node Assistance Scheme,MNAS)、节能分簇机制(Energy-Efficient Clustering Scheme,EECS)、节能路由机制(Energy-Efficient Routing Scheme,EERS)以及基于压缩感知的节能机制(Compress Sensing based Scheme,CSS)[10]。其中,EEMAC 聚焦于控制媒体接入以降低碰撞、过听、空闲侦听以及控制开销所导致的能量消耗[22]。一般来说,按照媒体接入方式可分为随机接入 MAC 协议、时隙接入 MAC 协议,帧接入 MAC 协议以及混合方式接入 MAC 协议,典型代表包括 S-MAC[23]、WiseMAC[24]、BEST-MAC[25]、E-BMA[26]等。MNAS 则主要通过移动 Sink 节点或者移动 Relay 的方式,在降低节点通信能耗的同时,均衡网络能耗,主要包括 CSPLI[27]、DT-MSM[28]、MRSC[29]等。EECS 以逻辑方式将网络划分成不同的分簇,从而形成具有层次结构的网络拓扑。每个分簇包括簇头节点和成员节点两种不同角色,成员节点负责簇内数据采集,簇头节点则负责将成员节点采集的数据简单处理并转发至 Sink 节点。一般而言,簇头节点采用“多跳转发”的路由模式以进一步降低通信能耗,同时通过周期性的簇头轮换机制均衡网络能耗。其最早的研究成果为 LEACH[30],通过控制不同网络区域的能耗分布来提高能量效率,进而延长网络生命期。类似的成果还包括 TEEN[31]、DHAC[32]、DISD[33]等。同时,可避免最优路径的相关节点能量率先耗尽,相关研究主要包括 GEEC[34]、SELAR[35]、EIRNG[36]等。CSS 则主要针对无线传感器网络存在的数据相关性,通过降低数据采集频率从数据源处减少网络的采集能耗与通信能耗[37]。此外,基于压缩感知的节能技术也可和分簇机制相结合,从而进一步提高能量效率。一般来说,CSS 机制主要包括平面型压缩感知机制、混合型压缩感知机制以及与分簇技术相结合的压缩感知机制,如 CDG[38]、EECSR[39]、SWECE[40]等。

尽管这类研究可在一定程度上延长 WSNs 网络生命期,然而传感器节点无法主动获得能量补充。因此,无法避免网络生命期的终结。显然这种技术无法实现无线传感器网络真正意义上的能量自治。

1.2　可再生能量收割技术

近年来,可再生能量收割技术(Energy Harvesting,EH)的出现为无线传感器网络能量自治提供了一种行之有效的解决方案[41]。具体地说,EH 技术主要采集广泛存在于自然界中的可再生能量,如太阳能、热能、电磁能、机械能等[42]。

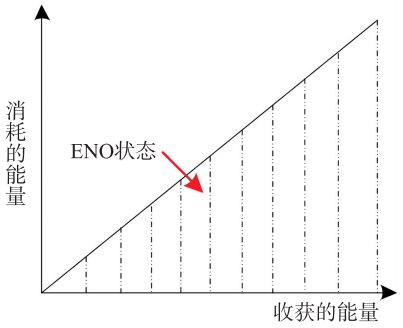


图 1　能量中立操作(ENO)

EH 技术有效地缓解了无线传感器网络因能量受限问题所带来的压力,使 WSNs 可在优先考虑能量补给的同时兼顾一定的网络性能要求。因此,现存的相关研究主要聚焦于如何在保证能量中立操作(Energy-Neutral Operation,ENO)的前提下实现网络性能最优,如提高网络吞吐量、降低网络延时等[43-44]。能量中立操作如图 1 所示。所谓能量中立操作,是指通过控制传感器节点行为保持能量收支平衡,从而实现节点能量自治[45]。具体来说,相关研究主要包括动态能量管理[46]、自适应占空比调度以及能量预测机制等[47]。

动态能量管理通过感知节点自身剩余能量与可再生能量的动态变化趋势,有效地进行节点工作模式与传输功率控制,保证各节点能量中立,并尽可能

提高网络吞吐量以及降低网络延时，相关研究主要包括 Fuzzyman[48]、WC-EWMA[49]、MTPP[50]、P&O MPPT[51]、WVR-PM[52]、ECAS[53]以及 EWMA[54]等。自适应占空比调度机制则依据节点剩余能量或者能量采集速率自适应调节节点占空比，在保证能量中立的前提下尽可能优化网络性能。相关研究主要包括 ODMAC[55]、DSP[56]、DeepSleep[57]及 SHR-TDMA[58]等。能量预测机制首先预判未来能量采集速率或者可采集能量密度，在此基础上有效控制节点的相关行为，从而保证节点能量中立。相关研究主要包括 QL-SEP[59]、Pro-Energy-VLT[60]以及 PCOR[61]等。

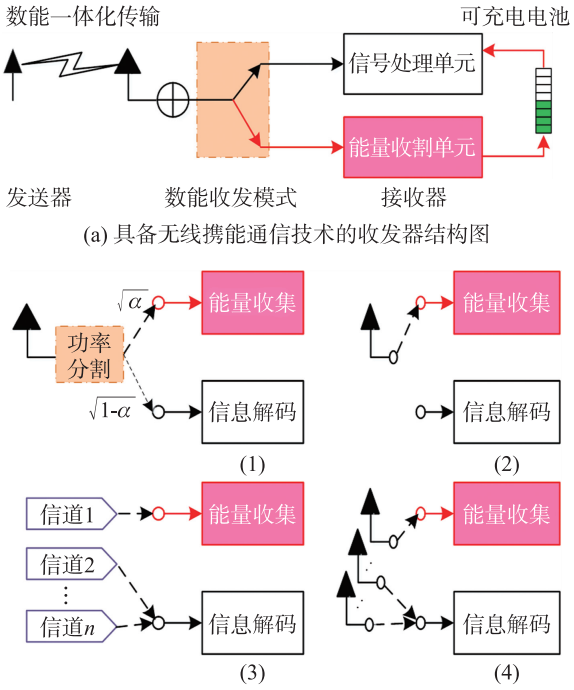
可再生能量收割技术可有效地缓解传感器节点能量不足的压力，实现无线传感器网络一定程度的能量自治。然而，可再生能量也存在供能不稳定、容易受时空影响等缺陷，因此，可再生能量收割技术无法为无线传感器网络的能量自治问题提供终极解决方案。

1.3 数能一体化传输供能技术

与不稳定、易受时空影响的可再生能量相比，近年来出现的无线能量传输技术（Wireless Power Transmission，WPT）是一种更加可行的供能手段。2008 年，Varshney 首度提出了可实现信息与能量同步传输的数能一体化传输技术（Simultaneous Wireless Information and Power Transfer，SWIPT）[62]。SWIPT 技术为无线传感器网络的能量自治问题提供了一种潜在的终极解决方案。与可再生能量收割技术相比，SWIPT 技术可提供更稳定、更可控以及可预测的能量来源。

数能一体化传输技术利用能量采集和信息解码过程对功率敏感度不同的特点，实现同步能量采集与信息解码[63]。图 2 所示为具备数能一体化传输功能的传感器接收单元结构以及四种不同的数能收集模式示意图。为方便起见，以下将具备数能一体化传输功能的传感器节点称为数能一体化传感器节点。显然，由图 2(a)所示可知，与传统无线传感器节点相比，数能一体化传感器节点须配备一个数能分割单元以及能量收割单元。通过合理地分配数能比，可保证节点在获取有效信息的同时收获多余的能量。图 2(b)所示为四种不同的数能收集模式。由图可知，现存的数能收集模式包括功率分割、时间切换、空间切换以及天线切换[64]。

目前，大多数研究主要聚焦于如何实现最佳功率分割比决策、最佳时间切换分配比以及接收器体系结构设计等[65]。一般来说，通过将功率分割比或时间切换调度问题建模为以数据传输速率为目标函数的最优化问题，最终将问题转化为凸优化问题来



(a) 具备无线携能通信技术的收发器结构图

(b) 数能收集模式

图 2 数能一体化传感器节点接收器结构及数能收集模式示意图

获得最优分割比[66]。另外，也包括针对具体网络拓扑下的最优无线能量传输决策，如多个中继节点的两段链路传输场景、基于树形拓扑的高能效数据传输模型等，相关研究主要包括 MOEA/D-NCS[67]、CSS[68]、EU-OCA[69]、MPSS[70]以及 CoMP[71]等。当然也存在针对具体应用场景下的相关研究，例如绿色农业物联网[72]、应用于移动无线传感器网络场景下的 ResAll 算法等[73]。一般来说，这些研究主要针对具体应用需求，在同步考虑能量自治的前提下尽可能兼顾相关的 QoS 需求，类似研究还包括合作网络[74]以及中继转发等[75]。

综上可知，现存的数能一体化传输供能技术的相关研究大多数致力于底层功率分割单元及时间切换单元设计、最优功率分割比及最优时间切换比决策；或着眼于底层通信技术，如结合 MIMO 技术、OFDM 技术；或针对具体应用场景等[72]。然而，将数能一体化传输供能技术与大规模部署的无线传感器网络相结合的相关研究相对较少。现存研究只是简单地与传统无线传感器网络分簇策略相结合，因而缺乏普适性[76]。相对来说，基于数能一体化传输技术的传感器节点设计目前已经相对成熟[77]。因此，将数能一体化传输技术与无线传感器网络相结合，不仅可以解决 WSNs 能量不足问题，也可进一步提高网络性能。

现存能量自治技术的分类统计情况如表 1 所示。

表 1　现有能量自治技术分类汇总表

类别	主要手段	特征	主要代表
被动式节能技术	媒体接入控制	降低因过听、碰撞以及控制开销导致的能耗	[23]、[24]、[25]、[26]
	节点辅助	通过辅助节点,实现网络能耗均衡	[27]、[28]、[29]
	分簇机制	通过将节点逻辑划分成不同的分簇,降低节点通信能耗,同时实现能耗均衡	[30]、[31]、[32]、[33]
	路由决策	避免最优路由上的节点能量过度消耗	[34]、[35]、[36]
	压缩感知	降低节点数据采集频率,降低能耗	[37]、[38]、[39]、[40]
可再生能量收割技术	动态能量管理	控制节点工作模式和传输功率	[48]、[49]、[50]、[51]、[52]、[53]、[54]
	自适应占空比调度	根据节点剩余能量和能量采集速率自适应调节其占空比	[55]、[56]、[57]、[58]
	能量预测	预判未来能量采集速率或者可采集能量密度,从而有效控制节点的相关行为	[59]、[60]、[61]
数能一体化传输功能技术	最佳数能比决策	控制节点的数能分割比	[65]、[66]
	具体网络拓扑	根据具体的网络拓扑进行能耗控制	[67]、[68]、[69]、[70]、[75]
	针对具体应用场景	与具体的应用场景相结合,决定节点的数能状态	[72]、[73]、[74]、[75]

2　数能一体化能量自治无线传感器网络

2.1　概述

基于上述分析,本文提出如图 3 所示的数能一体化能量自治无线传感器网络概念图。由图可知,数能一体化能量自治无线传感器网络主要从 MAC 层、网络层以及能量管理层面三个不同维度实现网络全局能量自治。具体地说,在 MAC 层,动态感知实时数能状态,控制媒体接入模式,实现节点级能量自治。显然,通过有效的媒体接入控制机制,降低节点接入控制能耗,并将节点因过听、碰撞等产生的能耗转化成一部分能量来源。通过这种方式,可有效地提高节点的数能效率。在网络层,则主要依据数能效率进行自适应路由决策,有效地规范网络中的信息流和能量流,从而实现路由级能量自治。同时,为实现网络全局范围内能量自治,需要周期性的外界能量补给。为此,在能量管理层面采用数能分布自适应无线移动能量补给机制。

如图 3 所示,对于每个传感器节点而言,在数能状态自感知 MAC 机制的控制下,可在短期内保持能

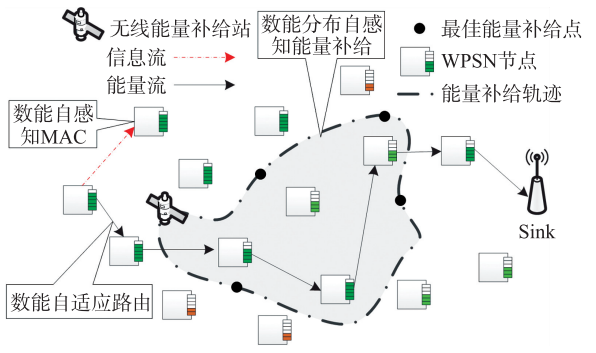


图 3　数能一体化能量自治无线传感器网络概念图

量自治。

假设当前传感器节点为 sn_i,其数能状态为 $\mathrm{Cond}(\gamma_{\mathrm{sn}_i},\eta_{\mathrm{sn}_i})$,基于无线能量传输的能量采集功率为 $P_h^{\mathrm{sn}_i}$,能量消耗功率记为 $P_c^{\mathrm{sn}_i}$。则在本文提出的 MAC 机制中,需满足如下条件:

$$\begin{aligned}&\mathrm{Cond}(\gamma_{\mathrm{sn}_i},\eta_{\mathrm{sn}_i})\xrightarrow{P_{\mathrm{MAC}}}\mathrm{Mode}(\mathrm{sn}_i)\\&\text{s.t.}\int_0^t P_h^{\mathrm{sn}_i}\mathrm{d}t-\int_0^t P_c^{\mathrm{sn}_i}\mathrm{d}t\geqslant 0\quad \mathrm{C}\end{aligned}\tag{1}$$

式中:$\mathrm{Mode}(\mathrm{sn}_i)$ 表示节点 sn_i 选定的工作模式,t 表示有限的一小段时间。限制条件(1).C 表明:通过感知当前节点数能状态,控制节点的媒体接入方式,最终可以保证节点在短期内实现能量自治。现考虑传感器节点进行路由决策时,如何确保沿路由节点能量自治。设当前节点为 sn_i 的可行下一跳节点集为 $\mathbf{Set}_{\mathrm{fn}}^{\mathrm{sn}_i}$,其数能效率为 $E(\gamma_{\mathrm{sn}_i},\eta_{\mathrm{sn}_i})$。在数能一体化能量自治无线传感器网络中,其路由决策过程可表示如下:

$$\begin{aligned}&\mathrm{Set}_{\mathrm{fn}}^{\mathrm{sn}_i}\xrightarrow{D_{\mathrm{rou}}(E(\gamma_{\mathrm{sn}_i},\eta_{\mathrm{sn}_i}),E(\gamma_{\mathrm{sn}_j},\eta_{\mathrm{sn}_j}))}\mathrm{sn}_j\\&\text{s.t.}\int_0^{t_{\mathrm{rou}}}P_h^{\mathrm{sn}_i}\mathrm{d}t-\int_0^{t_{\mathrm{rou}}}P_c^{\mathrm{sn}_i}\mathrm{d}t\geqslant 0\quad \mathrm{C1}\\&\int_0^{t_{\mathrm{rou}}}P_h^{\mathrm{sn}_j}\mathrm{d}t-\int_0^{t_{\mathrm{rou}}}P_c^{\mathrm{sn}_j}\mathrm{d}t\geqslant 0\quad \mathrm{C2}\end{aligned}\tag{2}$$

式中,sn_j 是节点 sn_i 经过路由决策 $D_{\mathrm{rou}}(E(\gamma_{\mathrm{sn}_i},\eta_{\mathrm{sn}_i}),E(\gamma_{\mathrm{sn}_j},\eta_{\mathrm{sn}_j}))$ 选定的下一跳节点,t_{rou} 表示路由有效持续时间,即从路由构建完毕到路由更新这段时间。式(2)表明:节点在路由决策时,根据节点及其可行下一跳节点当前时刻的数能状态,选择出可在路由时间内满足能量自治的节点作为其下一跳。

假设数据源节点记为 S，则由节点 S 到 Sink 节点的路由 $\mathrm{Rou}_{S\to\mathrm{Sink}}$ 可表示如下：

$$\mathrm{Rou}_{S\to\mathrm{Sink}}=\{\mathrm{link}(\mathrm{sn}_i),\ i\in\mathbf{SN}\} \tag{3}$$

式中：$\mathrm{link}(\mathrm{sn}_i)$ 为从节点 sn_i 到其下一跳节点构成的链路，**SN** 表示传感器节点构成的集合。由式(3)可知，在当前路由决策下，从节点 S 到 Sink 节点之间的路由上各节点可在时间 t_{rou} 内保持能量自治。由于传感器节点能量须用于数据采集和传输，在没有外界补充能量的情况下终究消耗殆尽。为此，网络中存在无线移动能量补给站，无线移动能量补给站在网络拓扑中周期性移动给网络拓扑中的能量低洼区域补充能量，实现网络全局能量自治。设网络拓扑中的能量补给点固定，且构成集合 $\mathbf{Set}_{\mathrm{np}}$，能量补给点记为 np，无线移动能量补给站在能量补给点的逗留时间记为 τ_{np}，则无线移动能量补给站的能量补给决策问题可表示如下：

$$\begin{aligned}&\min\sum_{i=1}^{l}x_{np_i}\times\tau_{np_i}\\&\text{s.t. }x_{np_i}\in\{0,1\}\qquad\text{C1}\\&\int_0^{\sum_{i=1}^{l}\tau_{np_i}}P_h^{\mathrm{sn}_i}\mathrm{d}t-\int_0^{\sum_{i=1}^{l}\tau_{np_i}}P_c^{\mathrm{sn}_i}\mathrm{d}t\geqslant 0\qquad\text{C2}\\&\mathrm{sn}_i\in\mathbf{SN}\qquad\text{C3}\end{aligned} \tag{4}$$

式中，l 表示网络拓扑中的能量补给点数量，x_{np_i} 是二值变量，表示无线移动能量补给站是否在对应的能量补给点 np_i 停留进行能量补充。由式(4)可知，在当前的供能策略下，可保证网络全局能量自治。

2.2 详细讨论

数能一体化能量自治无线传感器网络中，媒体接入控制机制将对节点的数能状态产生一定影响。为此，在设计数能状态自感知 MAC 协议时，应动态感知节点的实时数能状态。图 4 所示为数能状态自感知 MAC 协议概念图。由图可知，它属于混合型 MAC 协议，主要根据相关参与节点的实时数能状态选择媒体接入模式。具体地说，在数能状态 $\mathrm{Cond}(\gamma_1,\eta_1)$ 下，采取 TDMA 方式接入媒体；而在数能状态 $\mathrm{Cond}(\gamma_2,\eta_2)$ 下，则采取 CSMA/CA 方式接入媒体。一般地说，数能状态临界值 $\mathrm{Cond}(\gamma_1,\eta_1)$ 与 $\mathrm{Cond}(\gamma_2,\eta_2)$ 的确定取决于具体网络应用场景。

在数能状态自感知 MAC 协议中，媒体接入控制问题在本质上是一个动态决策问题。为动态感知传感器节点的实时数能状态，须根据节点数据产生率、当前剩余能量以及当前潜在内外的能量来源等因素来进行实时数能状态预估。可采用模糊数学逻辑原理构建数能状态自感知媒体接入控制规则库，以降低数能状态预估及媒体接入控制开销。模糊逻辑常被用于表达界限不清晰的定性知识与经验，模拟人脑实施规则型推理过程，解决因“排中律”的逻辑破缺而导致的种种不确定问题。因此，其适用于数能状态自感知 MAC 机制设计。

为适应大规模网络拓扑需求，ESWIPSN 往往采取“多跳转发”的数据传输模式。路由协议则是实现“多跳转发”的关键。路由协议决定数据传输路径，因而将影响沿路由各节点的能量消耗。同时，数能一体化能量自治无线传感器网络中各传感器节点的数能一体化传输模式也将对数据转发效率产生重要影响。因此，在数能一体化能量自治无线传感器网络中，沿路由节点的能量效率与其数据转发效率是相互影响的。为满足路由转发过程中参与节点的数据传输效率要求同时保证各节点能量自治，须实现数能效率自适应路由决策。

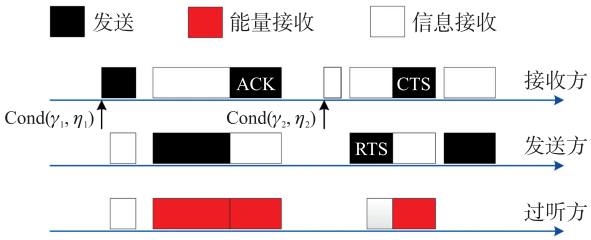


图 4 数能状态自感知 MAC 协议概念图

图 5 所示为数能一体化能量自治无线传感器网络中数能效率自适应路由决策概念图。由图可知，每个传感器节点以数据传输效率与能量效率的函数值为路由度量值进行路由决策，未被选为下一跳的邻居节点则可同时进行能量收割。路由构建完毕之后，数据转发过程中同时伴随着部分能量传输，最终可促使周围节点能量趋向于均衡。具体地说，经过一定时间的数据转发后，可提高选定路由上各节点的数据传输效率，同时亦能使剩余能量较低的节点及时获得一定程度的能量补充。

在数能效率自适应路由决策过程中，关键在于如何协调各相邻传感器节点的路由决策与转发决策

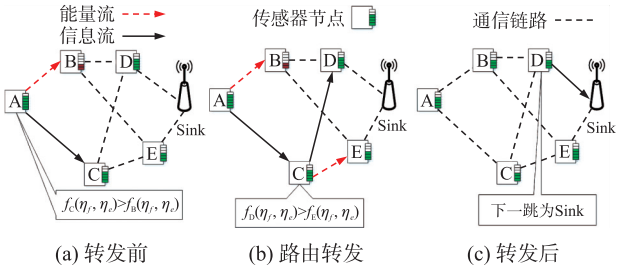
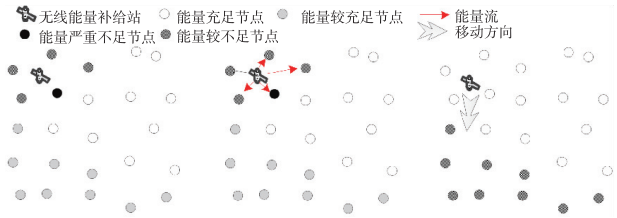


图 5 数能效率自适应路由决策概念图

行为之间的关系。然而,出于保护自身资源或其他因素的考量,节点难免因自私性而影响其决策行为。有效地规范各相关节点的决策行为,可避免节点自私性对网络数能效率带来的负面影响。事实上,传感器节点的路由决策行为在本质上是一个非合作博弈问题。博弈论是研究博弈参与各方争斗行为集合中是否存在最合理的行为方案以及如何找到这个合理行为方案的数学理论和方法[78]。能效自适应路由决策问题正是通过构造合适的效益函数来规范各传感器节点的决策行为,从而实现节点间的合作。因此,基于博弈理论可有效实现能效自适应路由决策。

尽管数能一体化传输技术的引入可以有效提高节点数能效率,在没有外界能量补充的前提下网络能量终将耗尽。为实现网络全局能量自治,须采用无线移动能量补给站为各传感器节点提供能量补充。此外,为提高能量补给效率,应使无线移动补给站根据网络数能实时分布状态进行自适应能量补给。为此,本文提出数能分布自感知无线能量补给机制概念模型,以实现网络全局能量自治。图 6 所示为该机制概念图,无线移动能量补给站实时感知能量密度与数据产生率,并提供周期性移动式能量补给。同时,无线移动能量补给站可在空闲时间通过获取太阳能进行自身的能量补给。



(a) 补充能量前　(b) 补充能量中　(c) 补充能量后

图 6　数能自感知无线能量补给机制概念图

上述数能分布自感知无线能量补给决策过程,其本质是一个旅行商问题。具体地说,根据网络全局拓扑的数据产生率、节点剩余能量分布、节点能量耗散速率确定无线移动能量补给站的能量补给策略。最终,通过求解特定网络数能分布状态下的能量补给站路径规划,可实现网络全局能量自治。一般而言,旅行商问题通常在交通运输、电路板线路设计以及物流配送等领域内有着广泛应用[79]。数能一体化能量自治无线传感器网络中无线移动能量补给站供能策略调度问题,在本质上等同于一个物流配送问题。因此,通过旅行商建模可实现网络全局下数能分布自感知无线能量补给。

3　机遇与挑战

3.1　机遇

数能一体化传输技术的提出在一定程度上为无线传感器网络能量自治问题的实现提供机遇。图 7 所示为数能一体化能量自治无线传感器网络与网络体系关系示意图。由图可知,数能一体化传输技术与无线传感器网络的结合点主要体现在网络协议栈中的物理层、数据链路层、网络层以及能量管理层面。在物理层,通过设计具备数能一体化传输功能的接收器单元,使传感器节点可以充分利用 RF 信号中的剩余能量,并采集周围环境存在的其他射频信号中的能量。在链路层,可通过控制节点工作模式,从过听和干扰信号中获得能量补充,从而有效地提高节点级和网络级的能量效率。在网络层,可以通过设计适用于数能一体化能量自治无线传感器网络的路由协议,合理地控制网络全局范围内的信息流和能量流,使网络中的能量从高密度向低密度区域转移,均衡化网络能量分布,从而有效地提高沿路由节点能量效率。此外,在无线移动能量补给站的支持下,对网络全局中的节点因通信而消耗的能量进行补充。综上所述,数能一体化传输可给无线传感器网络的能量自治问题带来一种全新解决方案。

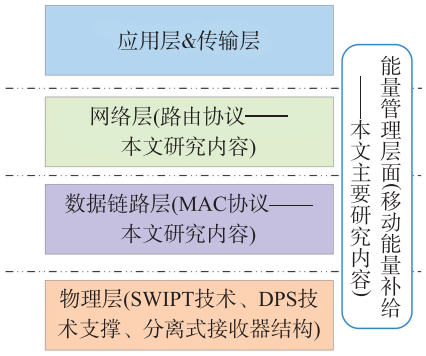


图 7　数能一体化能量自治无线传感器网络与网络体系的关系

由图 7 可知,现有的物理层相关技术可为本文提出的数能一体化能量自治无线传感器网络提供一定的技术支撑。因此,SWIPT 技术、DPS 技术以及分离式接收器结构等技术使数能一体化能量自治无线传感器节点进行数能一体化传输成为可能。与传统无线传感器节点相比,数能一体化传感器节点的工作模式除数据感知、接收、发送以及休眠模式之外,还应包括能量收割与数能同传模式。目前,国内外科研人员关于接收器最优化功率分割比例、最优化时隙切换比分配以及天线设计、编解码理论等方面的相关研

究已经相对很成熟,均以论文形式发表在国际著名会议及期刊杂志上,如 INFOCOM[80]、GLOBECOM[81]、ICC[82]、TOC[83]、TOMC[84]及 JSAC[85]等。

3.2 挑战

3.2.1 新工作模式增加了媒体接入控制复杂性

与传统无线传感器节点相比,数能一体化无线传感器节点新增了能量采集与数能同传两种工作模式。新增工作模式将对其媒体接入控制机制带来一定影响。例如,如何根据节点当前数能状态确定其工作模式及怎样依据节点的能量状态与当前工作环境估算媒体接入时隙大小等。因此,如何动态感知节点实时数能状态是数能一体化能量自治无线传感器网络数据链路层所面临的一个重要挑战,对于实现网络节点级能量自治至关重要。

3.2.2 路由决策与数能效率关系错综复杂

数能一体化无线传感器节点进行路由决策时,数据传输效率与能量效率之间存在不一致甚至相互矛盾之处。具体地说,选取剩余能量最高的邻居节点作为其下一跳有利于提高当前节点的数据转发效率;然而,选取距离自身最近的邻居节点作为下一跳则无疑更有利于提高能量效率。但是,能量最高的邻居节点往往并不一定是距离其自身最近的节点。因此,数能一体化能量自治无线传感器网络路由决策须兼顾网络的数能效率。另一方面,路由和数据转发行为本身也导致了网络数据流与能量流的动态变化,这在一定程度上反过来导致了路由决策的复杂性。因此,如何在兼顾数能效率的前提下进行路由决策是数能一体化能量自治无线传感器网络的重大挑战之一。

3.2.3 无线移动能量补给策略调度复杂

为确保网络全局能量自治,须部署无线移动能量补给站周期性地在网络拓扑中移动。然而,无线移动能量补给站的供能策略与节点自身状态;网络环境(如补给轨迹、补给周期等),及网络全局数能分布等因素之间存在复杂的相互作用。一方面,网络全局范围内的数能分布是无线移动能量补给站供能决策的重要依据;另一方面,无线移动能量补给站的供能策略是致使网络数能分布动态变化的重要原因之一。因此,如何制定无线移动能量补给站供能策略对于数能一体化能量自治无线传感器网络能量自治而言是一个重大挑战。

3.3 应用案例

现以智慧农业为例,简单分析数能一体化能量自治无线传感器网络面临的挑战。图 8 所示为基于数能一体化能量自治无线传感器网络的智慧农业示例[72]。由图可知,基于数能一体化能量自治无线传感器网络的智慧农业包括管理层面、本地信息中心以及数能一体化能量自治无线传感器网络。其中,数能一体化能量自治无线传感器网络主要负责信息采集,将搜集的信息上传至本地信息中心。本地信息中心可基于所采集的信息应用于智慧农场、智慧育种以及智慧温室等。同时,本地信息中心也会将相关信息进一步上传至管理层面。管理层面根据来自下层的信息进行跨层管理、智慧农业监控以及资源优化调度等。

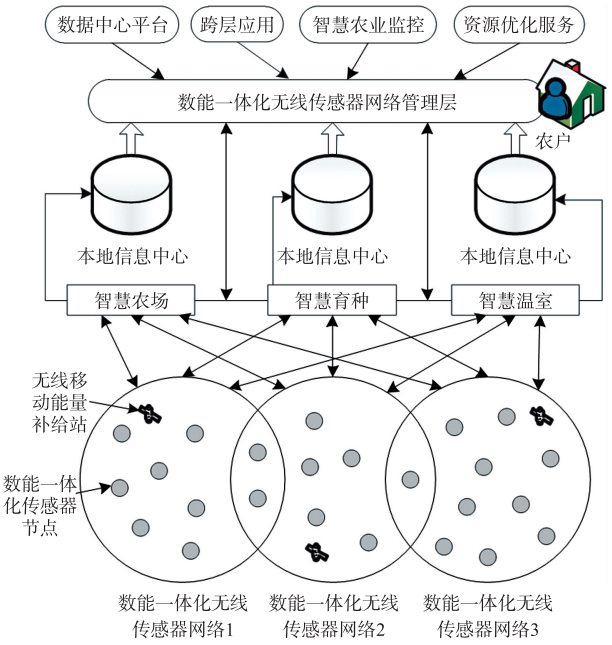


图 8 数能一体化能量自治无线传感器网络在智慧农业中的应用

为实现对农田的智能化监测,传感器节点一般以密集方式铺设。由于传感器节点都具有数能一体化传输功能,所有节点在铺设之后可以实现能量自治,大大降低了网络的运营和维护成本,市场前景良好。一般而言,动态感知节点处于数能状态时,传感器节点须实时感知周围环境状况。由于其感知能耗较大,导致其数能状态随时间变化较快。因此,如何动态感知节点的实时数能状态具有一定复杂性,这使得节点工作模式控制更为复杂。同时,节点的工作模式反过来又将影响节点的能量状态,继而影响节点级能量自治的实现。因此,数能一体化能量自治无线传感器网络的 MAC 机制设计有其复杂性。另外,传感器节点在进行路由选择时,同样面临自身及其可行下一跳节点数能效率难以判断的情形。一般地说,这种复杂性会随着传感器节点密度的增加而增大。而对于智慧农业领域来说,传感器节点铺设密度普遍较大。因此,对于智慧农业领域而言,数

能一体化能量自治无线传感器网络在路由决策时面临亟待解决的难题。最后,为实现对农场的持续监测,确保网络全局能量自治,给节点提供周期性能量补给至关重要。然而,传感器节点所处环境在不断变化中,因为网络数能分布将随着环境的动态变化而变化。数能变化的动态性在一定程度上导致了无线能量补给策略的复杂性。因此,在数能一体化能量自治无线传感器网络中,基于网络数能分布的能量补给面临一定的挑战。

4　总结与展望

4.1　总结

本文对现存的无线传感器网络节能策略进行了详细综述,按照节点能否进行能量采集以及能量来源的不同划分为被动式节能技术、可再生能量收割技术以及数能一体化传输供能技术三类能量自治技术。此外,对三类能量自治技术相关研究成果进行了详细的总结与分类,并在此基础上提出了数能一体化能量自治无线传感器网络概念模型。最后,科学地分析了数能一体化能量自治无线传感器网络存在的机遇与面临的挑战。

数能一体化传输技术的出现在一定程度上给无线传感器网络的能量自治问题带来了一种行之有效的解决方案。具体地说,数能一体化传输技术应用于无线传感器网络,可解决传统无线传感器节点铺设之后无法继续供能的难题,同时也克服了可再生能源供能技术存在的能量来源不稳定、受限于时空因素等缺陷。尽管如此,应用数能一体化传输技术实现无线传感器网络能量自治依然存在一定的挑战。例如,数能一体化传输模式的引入将给无线传感节点媒体接入控制带来一定程度的冲击。具体地说,由于无线能量采集模式的引入,传统传感器节点因空闲侦听消耗能量的问题将不复存在,且可用于补充能量。同时,数能一体化传输技术的引入也将改变原有的无线传感器节点的路由决策机制。在数能一体化能量自治无线传感器网络中,信息流与能量流共存的特征使路由选择变得更趋复杂。最后,在采用无线移动能量补给站给传感器节点进行能量补给时,如何在确保网络全局能量自治的同时降低能量补给成本也是一个亟待解决的复杂问题。

4.2　展望

当下,数能一体化能量自治无线传感器网络技术还不够成熟,本文在分析了其发展机遇和面临诸多挑战的基础上指出数能一体化能量自治无线传感器网络未来可行的研究方向。简单地说,为实现数能一体化无线传感器网络全局能量自治,可分别通过研究媒体接入控制、路由决策以及无线能量补给决策来实现数能一体化无线传感器网络能量自治,构建“点”、“线”以及“面”多级维度的能量自治理论体系。未来数能一体化能量自治无线传感器网络的研究中以下三个方面值得关注。①针对数能一体化能量自治无线传感器网络中,数能一体化传输技术对节点接入模式的影响,设计数能实时状态感知模块,将数能实时状态作为接入决策的控制输入变量,通过数能状态自感知媒介接入控制实现“点”级能量自治。②数能一体化能量自治无线传感器网络中,传感器节点不同的工作模式将对数据“多跳转发”过程中的数能效率产生影响。设计关于能量效率与转发效率的动态路由更新因子,以控制路由动态更新。最终,通过多跳传输过程的数能效率自适应路由,实现网络“线”级能量自治。③数能状态自感知 MAC 协议以及路由协议可在短期内保证网络局部能量自治。因而,可引入无线移动能量补站对无线传感器节点进行能量补充。为此,可基于社会福利理论,动态规划无线移动能量供给站的供能轨迹,实现网络“面”级能量自治。

参考文献:

[1] Ai-Fuqaha A,Guizani M,Mohammadi M,et al. Internet of Things:A Survey on Enabling Technologies,Protocols,and Applications[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2015,17(4):2347-2376.

[2] Ai-Anbagi I,Erol-Kantarci M,Mouftah H T. A Survey on Cross-Layer Quality-of-Service Approaches in WSNs for Delay and Reliability-Aware Applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2016,18(1):525-552.

[3] Misra S,Deb P K,Koppala N,et al. S-Nav:Safety-Aware IoT Navigation Tool for Avoiding COVID-19 Hotspots[J]. IEEE Internet of Things,2021,8(8):6975-6982.

[4] Lin D,Min W,Xu J,et al. An Energy-Efficient Routing Method in WSNs Based on Compressive Sensing:From the Perspective of Social Welfare[J]. IEEE Embedded Systems Letters,2021,13(3):126-129.

[5] Ma D,Lan G,Hassan M,et al. Sensing,Computing,and Communications For Energy Harvesting IoTs:A Survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2020,22(2):1222-1250.

[6] Wang Q,Lin D,Yang P,et al. An Energy-Efficient Compressive Sensing-Based Clustering Routing Protocol for WSNs[J]. IEEE Sensors Journal,2019,19(10):3950-3960.

[7] 翟双. 低能耗物联网无线链路数据格式与网络拓扑研

究[D]. 长春:吉林大学,2020.
[8] 丁辉. 双碳背景下中国气候投融资政策与发展研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2021.
[9] Lin D,Gao L,Min W. A Social Welfare Theory-Based Energy-Efficient Cluster Head Election Scheme for WSNs[J]. IEEE Systems Journal,2021,15(3):4492-4502.
[10] 林德钰. 无线传感器网络节能策略关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
[11] Aziz A A,Sekercioglu Y A,Fitzpatrick P. A Survey on Distributed Topology Control Techniques for Extending the Lifetime of Battery Powered Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2013,15(1):121-144.
[12] Younis O,Krunz M,Ramasubramanian S. Node Clustering in Wireless Sensor Networks:Recent Developments and Deployment Challenges[J]. IEEE Networks,2006,20(3):20-25.
[13] Han K,Luo J,Liu Y. Algorithm Design for Data Communications in Duty-Cycled Wireless Sensor Networks:A Survey[J]. IEEE Communications Magazine,2013,51(7):107-113.
[14] Gu Y,Ren F,Ji,et al. The Evolution of Sink Mobility Management in Wireless Sensor Networks:A Survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2016,18(1):507-524.
[15] Younis O,Mrunz M,Ramasubramanian S. Node Clustering in Wireless Sensor Networks:Recent Developments and Deployment Challenges[J]. IEEE Network,2006,20(3):20-25.
[16] Pantazis N A,Nikolidakis S A,Vergados D D. Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks:A Survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2013,15(2):551-591.
[17] Yetgin H,Cheung K T K,El-Hajjar M,et al. A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2017,19(2):828-854.
[18] Lin D Y,Wang Q,Min W D,et al. A Survey of the Energy Efficient Strategies in Wireless Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Sensor Networks,2020,17(1):3.
[19] Soua R,Minet P. A Survey on Energy Efficient Techniques in Wireless Sensor Networks[C]//The 4th Joint IFIP Wireless and Mobile Networking Conference(WMNC 2011),Toulouse,France,2011:1-9.
[20] Cirstea C. Energy Efficient Routing Protocols for Wireless Sensor Networks:A Survey[C]//The 17th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging(SIITME 2011),Timisoara,Romania,2011:277-282.
[21] Ali A W,Parmanand A. Energy Efficiency in Routing Protocol and Data Collection Approaches for WSN:A Survey[C]//The International Conference on Computing,Communication & Automation,Noida,India,2015:540-545.
[22] Quintero V L,Estevez C,Orchard M E,et al. Improvements of Energy-Efficient Techniques in WSNs:A MAC-Protocol Approach[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2019,21(2):1188-1208.
[23] Ye W,Heidemann J,Estrin D. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies(INFOCOM 2002),New York,NY,USA,2002:1567-1576.
[24] Hoiydi A,Decotignie J D,Enz C,et al. WiseMAC:An Ultra Low Power MAC Protocol for the WiseNET Wireless Sensor Network[C]//The 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems(Sensys 2003),Los Angeles,CA,USA,2003:302-303.
[25] Ci S,Sharif H,Nuli K. Study of an Adaptive Frame Size Predictor to Enhance Energy Conservation in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2005,23(2):283-292.
[26] Shafiullah G M,Azad S A,Ali A B M S. Energy-Efficient Wireless MAC Protocols for Railway Monitoring Applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2013,14(2):649-659.
[27] Liang W,Luo J,Xu X. Prolonging Network Lifetime via a Controlled Mobile Sink in Wireless Sensor Networks[C]//The 2010 IEEE Global Telecommunication Conference(GLOBECOM 2010),Miami,FL,USA,2010:1-6.
[28] Yun Y,Xia Y. Maximizing the Lifetime of Wireless Sensor Networks with Mobile Sink in Delay-Tolerant Applications[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2010,9(9):1308-1318.
[29] Shen Z,Jiang H. Mobile Relay Scheduling in Partitioned Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2016,65(7):5563-5578.
[30] Handy M J,Haase M,Timmermann D. Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy with Deterministic Cluster-Head Selection[C]//The 4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network,Stockholm,Sweden,2002:368-372.
[31] Manjeshwar A,Agrawal D. TEEN:A Routing Protocol for Enhanced Efficiency in Wireless Sensor Networks[C]//The 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium Work-Shops(IPDPS 2001),CA,USA,2001:2009-2015.
[32] Lung C H,Zhou C. Using Hierarchical Agglomerative Clustering in Wireless Sensor Networks:An Energy-

Efficient and Flexible Approach[J]. Ad Hoc Networks, 2010,8(3):328-344.

[33] Singh B,Lobiyal D K. An Energy-Efficient Adaptive Clustering Algorithm with Load Balancing for Wireless Sensor Network[J]. International Journal of Sensor Networks, 2012,12(1):37-52.

[34] Lin D,Wang Q. A Game Theory Based Energy Efficient Clustering Routing Protocol for WSNs[J]. Wireless Networks,2017,23(4):1101-1111.

[35] Lukachan G,Labrador M. SELAR:Scalable Energy-Efficient Location Aided Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//The 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks,FL,USA,November 2004:16-18.

[36] 林德钰,王泉,刘伎昭. 基于非合作博弈的簇间能量优化路由算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(11):95-100.

[37] Donobo D L,Elad M,Temlyakov V N. Stable Recovery of Sparse Overcomplete Representations in the Presence of Noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006,52(1):6-18.

[38] Luo C,Wu F,Sun J,et al. Compressive Data Gathering for Large-Scale Wireless Sensor Networks[C]//The 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking,Beijing,China,2009:145-156.

[39] Lin D,Min W,Xu J. An Energy-Saving Routing Integrated Economic Theory with Compressive Sensing to Extend The Lifespan of WSNs[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020,7(8):7636-7647.

[40] Lin D,Gao L,Min W. A Social Welfare Theory-Based Energy-Efficient Cluster Head Election Scheme for WSNs[J]. IEEE Systems Journal,2021,15(3):4492-4502.

[41] Zhang Y,He S,Chen J,et al. Distributed Sampling Rate Control for Rechargeable Sensor Nodes with Limited Battery Capacity[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2013,12(6):3096-3106.

[42] Sherazi H H R,Grieco L A,Boggia G. A Comprehensive Review on Energy Harvesting MAC Protocols in WSNs: Challenges and Tradeoffs[J]. Ad Hoc Networks,2018,71(1):117-134.

[43] Wu J, Chen W. Low-Latency and Energy-Efficient Wireless Communications with Energy Harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2022,21(2):1244-1256.

[44] Chamanian S,Baghaee S,Ulusan H,et al. Implementation of Energy-Neutral Operation on Vibration Energy Harvesting WSN[J]. IEEE Sensors Journal,2019,19(8):3092-3099.

[45] Hu J,Luo J,Zheng Y,et al. Graphene-Grid Deployment in Energy Harvesting Cooperative Wireless Sensor Networks for Green IoT[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2019,15(3):1820-1829.

[46] Castagnetti A,Prgatoquet A,Le T N,et al. A Joint Duty-Cycle and Transmission Power Management for Energy Harvesting WSN[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2014,10(2):928-936.

[47] Ko H,Pack S,Leung V C M. Energy Utilization-Aware Operation Control Algorithm in Energy Harvesting Base Stations[J]. IEEE Internet of Things Journal,2019,6(6):10824-10833.

[48] Aoudia F A,Gautier M,Berder O. Fuzzy Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes[C]//The IEEE International Conference on Communications (ICC 2016),Kuala Lumpur,Malaysia,2016:1-6.

[49] Yang S, Yang X, Mccann J A, et al. Distributed Networking in Autonomic Solar Powered Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2013,31(12):750-761.

[50] Fujii C,Seah W K G. Multi-Tier Probabilistic Polling in Wireless Sensor Networks Powered by Energy Harvesting[C]//The 7th International Conference on Intelligent Sensors,Sensor Networks and Information Processing,Adelaide,SA,Australia,2011:383-388.

[51] Liu L,Huang C,Mu J,et al. A P&O MPPT with a Novel Analog Power-Detector for WSNs Applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II:Express Briefs, 2020,67(10):1680-1684.

[52] Le T N,Pegatoquet A,Berder O,et al. Energy-Efficient Power Manager and MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Sensor Networks Powered by Periodic Energy Harvesting Sources[J]. IEEE Senors Journal, 2015, 15(15): 7208-7220.

[53] Chen Q,Gao H,Cai Z,et al. Energy-Collision Aware Data Aggregation Scheduling for Energy Harvesting Sensor Networks[C]//The IEEE Conference on Computer Communications(INFOCOM 2018),Honolulu,HI,USA,2018:117-125.

[54] Kansal A,Hsu J,Zahedi S,et al. Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems,2007,6(4):32-es.

[55] Fafoutis X, Dragoni N. ODMAC: An on-Demand MAC Protocol for Energy Harvesting-Wireless Sensor Networks[C]//The 8th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks,Miami,FL,USA,2011:49-56.

[56] Yoo H,Shim M,Kim D. Dynamic Duty-Cycle Scheduling Schemes for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(2): 202-204.

[57] Lin H H,Shih M J,Wei H Y,et al. DeepSleep:IEEE 802.11 Enhancement for Energy-Harvesting Machine-to-Machine Communications[J]. Wireless Networks,2014,21(2):357-370.

[58] Gong S,Liu X,Zheng K,et al. Slot-Hitting Ratio-Based TDMA Schedule for Hybrid Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks[J]. IET Communications,2020,14(12):1949-1956.

[59] Kosunalp S. A New Energy Prediction Algorithm for Energy-Harvesting Wireless Sensor Networks with q-Learning[J]. IEEE Access,2016,4(1):5755-5763.

[60] Cammarano A,Petrioli C,Spenza D. Online Energy Harvesting Prediction in Environmentally-Powered Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Sensors Journal,2016,16(17):6793-6804.

[61] Pal A,Nasipuri A. Joint Power Control and Routing for Rechargeable Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Access,2019,7(1):123992-124007.

[62] Varshney L R. Transporting Information and Energy Simultaneously[C]//2008 IEEE International Sysmposium on Information Theory(ISIT2008),Toronto,ON,Canada,2008:1612-1616.

[63] Zhou X,Zhang R,Ho C K. Wireless Information and Power Transfer:Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff[J]. IEEE Transactions on Communications,2013,61(11):4754-4767.

[64] Jin Y,Kwak K S,Yoo S J. A Novel Energy Supply Strategy for Stable Sensor Data Delivery in Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Systems Journal,2020,14(3):3418-3429.

[65] Perera P D,Jayakody D N K,Sharma S K,et al. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer(SWIPT):Recent Advances and Future Challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2018,20(1):264-302.

[66] Lu Y,Xiong K,Fan P,et al. Robust Transmit Beamforming with Artificial Redundant Signals for Secure SWIPT System under Non-Linear EH Model[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication,2018,17(2):2218-2232.

[67] Jiao D,Yang P,Fu L,et al. Optimal Energy-Delay Scheduling for Energy-Harvesting WSNs with Interference Channel via Negatively correlated Search[J]. IEEE Internet of Things Journal,2020,7(3):1690-1703.

[68] Liu T,Wang X,Zheng L. A Cooperative SWIPT Scheme for Wirelessly Powered Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Communications,2017,65(6):2740-2752.

[69] Ko H,Pack S,Leung V C M. Energy Utilization-Aware Operation Control Algorithm in Energy Harvesting Base Stations[J]. IEEE Internet of Things Journal,2019,6(2):10824-10833.

[70] Boukerche A,Wu Q,Sun P. A Novel Two-Mode QoS-Aware Mobile Charger Scheduling Method for Achieving Sustainable Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing,2022,7(1):14-26.

[71] Xu J,Zhang R. Cooperative Energy Trading in CoMP Systems Powered by Smart Grids[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2016,65(4):2142-2153.

[72] Lu W,Xu X H,Huang G X,et al. Energy Efficiency Optimization in SWIPT Enabled WSNs for Smart Agriculture[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(6):4335-4344.

[73] Guo S,Shi Y,Yang Y,et al. Energy Efficiency Maximization in Mobile Wireless Energy Harvesting Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2018,17(7):1524-1537.

[74] Chen X,Liu Y,Cai L X,et al. Resource Allocation for Wireless Cooperative IoT Network with Energy Harvesting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2020,19(7):4879-4893.

[75] Jiang R,Xiong K,Fan P,et al. Outage Probability and Throughput of Multirelay SWIPT-WPCN Networks with Nonlinear EH Model and Imperfect CSI[J]. IEEE Systems Journal,2020,14(1):1206-1217.

[76] Choi H,Ron D,Sengly M,et al. Energy-Neutral Wireless Sensor Network Based on SWIPT in Wireless Powered Communication Networks[C]//2020 IEEE International Conference on Communications(ICC 2020),Dublin,Ireland,2020:1-7.

[77] Jia J,Ma L,Chen J,et al. Joint Optimization on Power Allocation and Splitting for WSNs with SWIPT-Based Relay[J]. IEEE Sensors Journal,2022,22(3):2877-2888.

[78] Lin D,Min W,Xu J. An Energy-Saving Routing Integrated Economic Theory with Compressive Sensing to Extend the Lifespan of WSNs[J]. IEEE Internet of Things Journal,2020,7(8):7636-7647.

[79] Deng L J,Xu W Z,Liang W F,et al. Approximation Algorithms for the min-max Cycle Cover Problem with Neighborhoods[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2020,28(4):1845-1858.

[80] Gao Y,Yang C,Lu W D,et al. Joint Resource Optimization in Two-Way Relaying Energy Harvesting Cognitive Sensor Network[C]//IEEE INFOCOM 2021—IEEE Conference on Computer Communications Workshops(INFOCOM WKSHPS),Vancouver,BC,Canada,2021:1-6.

[81] Wang M J,Tseng F S,Lin C T. Robust Beamforming Design for SWIPT—Enabled Hierarchical Cognitive Radio Networks[C]//2019 IEEE Global Communications Conference(GLOBECOM),Waikoloa,HI,USA,2019:1-5.

[82] Zhu Z Y, Wang Z X, Lin Y, et al. Robust max-min Fair Beamforming of Secrecy SWIPT IoT Systems Under a Non-Linear EH Model [C]//2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Montreal, QC, Canada, 2021: 1-6.

[83] Ntougias K, Krikidis I. Probabilistically Robust Optimization of IRS-Aided SWIPT under Coordinated Spectrum Underlay [J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(4): 2298-2312.

[84] Jiang H, Xiao Z, Li Z, et al. An Energy-Efficient Framework for Internet of Things Underlaying Heterogeneous Small Cell Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(1): 31-43.

[85] Tan F, Wu P, Wu Y C, et al. Energy-Efficient Non-Orthogonal Multicast and Unicast Transmission of Cell-Free Massive MIMO Systems with SWIPT[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(4): 949-968.

郭新明(1979-),硕士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为物联网技术、网络空间安全,guoxinming118@126.com;

林德钰(1988-),工学博士,副教授,主要研究方向为物联网节能技术、群智感知及雾计算,dashing_lin@126.com;

陈　伟(1976-),硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络技术,chenwei1880@126.com。