

基于“云-管-边-端”物联网架构的碳排放监测

邢方圆^{1,2}, 贺诗波², 孙铭阳², 陈积明²

(1. 东南大学网络空间安全学院, 江苏 南京 211189; 2. 浙江大学控制科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:近年来,我国积极参与全球气候治理进程。碳排放的精准、快速与可靠监测是实现碳排放态势感知、整体布局优化的核心基础,目前该方向的研究仍缺乏系统性梳理。首先,调研了碳排放监测的发展进程,归纳了国内外的现行标准。然后,分别探究了基于终端设备与基于物联网的碳排放监测方法,总结出基于物联网的监测方法具有结构清晰、设计灵活、传输可靠等优势。最后,基于“云-管-边-端”物联网架构提出一种工业碳排放监测体系,并总结了实现“云-管-边-端”4个方面的潜在关键技术,旨在对未来碳排放监测的相关研究提供一定参考。

关键词:物联网;碳排放;云-管-边-端;实时监测

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00281

Carbon emission monitoring based on internet of things with cloud-tube-edge-end structure

XING Fangyuan^{1,2}, HE Shibo², SUN Mingyang², CHEN Jiming²

1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University Nanjing 211189, China

2. College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: In recent years, China has participated in the global climate governance with a positive stance. The accurate, rapid, and reliable monitoring is fundamental for the situation awareness and layout optimization of the carbon emission. However, the state-of-the-art review with systematic studies of this topic has hardly been identified. The development process and the existing standards of carbon emission monitoring were investigated. The terminal equipment-based methods and the internet of things (IoT)-based applications for carbon emission monitoring were explored, and the IoT-based methods were concluded which hold the advantages including clear structure, flexible design, and reliable transmission. Based on the IoT, an industrial carbon emission monitoring method using the “cloud-tube-edge-end” IoT structure was established. The enabling technologies that can implement the functions of the “cloud-tube-edge-end” were summarized, which are expected to provide guidance for future carbon emission monitoring.

Key words: IoT, carbon emission, cloud-tube-edge-end, real-time monitoring

0 引言

长期以来,我国高度重视全球气候变化,积极推进应对气候变化的相关措施和战略。由国家社会经济等人为活动产生的CO₂排放是影响气候变化的

重要因素之一。目前,我国碳排放仍在随着经济发展而不断增加^[1-2]。

在国际现有的碳减排方法中,碳交易市场能够利用市场机制有效控制并减少温室气体排放,是实现碳减排的有效途径^[3]。2021年6月初,上海联合

收稿日期: 2022-04-02; 修回日期: 2022-09-13

通信作者: 贺诗波, s18he@zju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.U1909207, No.U20A20159, No.62103371)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.U1909207, No.U20A20159, No.62103371)

产权交易所的碳排放权交易系统通过验收；生态环境部等多部委于 2021 年 7 月 16 日宣布全国碳交易市场启动线上交易，交易中心落地上海，碳配额登记系统设在湖北武汉，我国碳市场将成为全球覆盖温室气体排放量规模最大的市场。

碳交易通过设计一定的价格机制调节交易市场中参与企业的行为，各企业通过对比碳减排技术所需要的投资和购入碳排放配额的花销权衡是否采用低碳技术，纳入碳交易体系的公司每排放一吨 CO₂，就需要有一个单位的碳排放配额。此外，碳交易机制可以兼顾企业的经济效益，例如，若碳配额的价格上涨影响企业成本并阻碍了企业的利润增长，这时碳交易即便可以达成碳减排的目标，制定的规则也不尽合理。碳交易市场正常运行的前提是监管部门对覆盖范围内的企业设定合理的排放总量，设计有效的配额分配方案，并通过市场交易机制促使企业在利益驱动下进行碳减排。由此可见，在碳交易市场中，碳排放量的监测是制定碳价、发放配额、维护碳交易市场高效运转的重要基础。

然而，国内企事业单位的现有碳排放量计算方法大多基于传统手工核算法。2019 年，国家在对碳排放核查机构的核查报告进行随机审计时发现，现有基于手工核算法所得到的企业自报碳排放量与实际排放量相差较大。这些偏差发生在各类能源消费水平统计偏差和碳排放因子测度偏差两个方面，表明企业没有故意歪曲其排放量，而是传统手工核算法的准确度本身存在一定的局限性。只有当全国碳市场能准确计算其所覆盖的碳排放量，碳交易机制的作用才能得到有效发挥。因此，全面、准确跟踪测量企业的温室气体排放量，有助于对企业进行碳排放量配额的合理分配，推动碳交易市场高效运转，从而促进碳排放权交易的市场机制发挥作用。

开展碳排放监测研究，既是打通气态污染物与温室气体统一监管通道、推动构建现代环境监测体系的

重要内容；也是完善碳排放报告方法学、充分发挥碳市场资源配置作用的需要；还是实现碳排放数据管理数字化、智能化、信息化的内在需求。随着国际资源环境要素约束的加剧，如何实现碳排放的精准监测、保障中国经济可持续发展，对我国的长远发展至关重要。因此，本文将对国内外碳排放监测的发展历程、标准、方法进行归纳汇总，并基于“云-管-边-端”物联网架构提出一种碳排放体系监测体系，总结建设“云-管-边-端”4 个层面的潜在关键技术，旨在为实现我国高精度、广覆盖碳排放监测提供一个新思路。

1 碳排放监测的发展进程与现行标准

碳排放包含自然源和人为源排放，本文将重点对国内外人为源排放监测的管理要求和技术现状开展相关调研。

能源和工业过程温室气体排放的监测主要包括从能源消耗（如煤、石油、天然气、生物质燃烧中的 CO₂、N₂O 和 CH₄）、工业过程、交通和建筑业等过程中温室气体排放的监测，其中，工业过程温室气体监测范围包括对 CO₂、N₂O、CH₄ 等温室气体的监测^[4]。人为源碳排放监测的基本方法如图 1 所示。

1.1 国外发展现状

目前，国际上关于工业过程中的碳排放监测主要集中在发达国家。国外关于温室气体排放的直接监测对象均为设施层面，美国和欧盟等国家和组织针对境内大型温室气体排放源分别制定了相应的温室气体报告制度。

美国积极推行各类温室气体减排政策，于 2009 年制定并颁布了《温室气体强制性报告法规》，规定美国境内主要监测气体种类为《京都议定书》规定的 6 种主要温室气体和其他氟化气体，建立了一套完整的强制性温室气体报告体系^[5-6]。排放源的监测有两种方式：一是手工核算法，即基于加工、燃料、排放因子和环保署认定方程式分类计算温室气

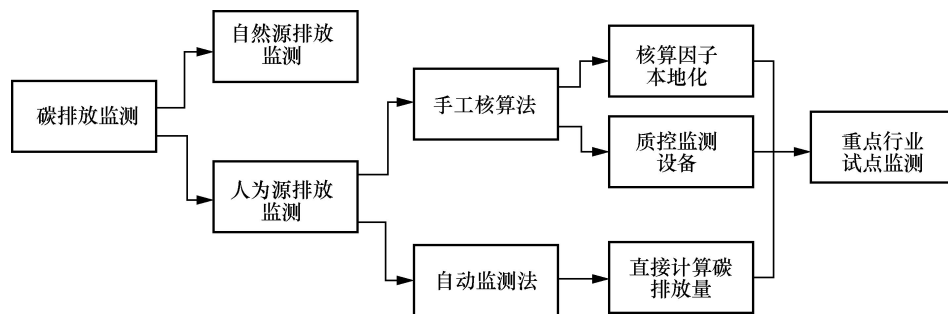


图 1 人为源碳排放监测的基本方法

体排放量；二是连续排放监测系统（CEMS, continuous emission monitoring system）法，目前，美国燃煤电厂基本采用 CEMS 监测碳排放量，其安装成本约为 30~40 万美元，运维成本每年约为 1.5 万美元^[7]。

欧盟于 2003 制定了《欧盟温室气体配额交易指令》（2003/87/EC），并且针对该指令自 2004 年起陆续颁布了 3 个版本的《温室气体监测和报告指南》^[8]。其中，指南规定 CEMS 是欧盟参与排放交易的工业设施温室气体排放监测的重要方法之一。然而，由于燃烧煤种单一、CEMS 安装维护成本较大等，目前欧盟排放监测方法仍主要采用手工核算法。

日本于 2005 年批准了《京都议定书目标达成计划》，同时按照修订后的《全球气候变暖对策推进法》（1998 年 117 号）要求，正式引入并执行针对大型排放企业的“温室气体排放强制计算、报告和披露系统”。该系统主要监管 6 种温室气体，规定能源消耗超过 1 500 kL/a 的企业、大学、地方政府、运输公司等机构，以及员工超过 21 人且所在办公室年排放超过 3 000 T CO₂ 的机构必须上报其温室气体排放量，并接受监督^[9]。

澳大利亚气候变化和能效部于 2007 年制定了《国家温室气体与能源报告法案》，并成立了一个独立的法定机构来加强该法案与其他相关法律之间的协同作用，为能源和温室气体报告提供一个独立化、集中化的管理平台。

1.2 国内发展现状

我国政府高度重视碳排放的监测。自 2009 年起，我国将碳强度下降目标作为约束性指标纳入国民经济和社会发展的中长期规划。2020 年 12 月，我国颁布了《碳排放权交易管理办法（试行）》，推进开放碳交易市场以促进碳减排。2021 年 1 月，生态环境部印发《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》，明确提出“推动监测体系统筹融合”。

在重点行业的废气排放监测方面，国家自“十一五”以来，为了控制 SO₂ 和 NO_x 的排放，已要求重点行业废气排放相关企业安装 CEMS 设备。2021 年 2 月，浙江省能源大数据中心成功研发浙江省首个电力系统碳排放监测平台，并将中国华电杭州半山发电有限公司的相关生产大数据正式接入该平台，有效助力了以电力为枢纽的能源减排体系的构建。

在标准方面，我国先后制定并发布多个国家标准用于监测温室气体排放。自 2015 年以来，国家标准化管理委员会等单位批准了《工业企业温室气体排放核算和报告通则》等多项国家标准，详细规定了电力、钢铁、水泥、煤炭及纺织服装等行业的温室气体排放核算与标准^[10-11]。

目前，我国温室气体排放量计算仍主要依据《2006 IPCC 国家温室气体清单指南（2019 修订版）》进行核算，监测作为辅助手段，用于核算因子的确定和评价。标准体系方面，我国尚缺少固定源 CO₂ 自动监测技术规范，现场快速监测方法体系也存在较大空缺亟待填补。

2 碳排放监测方法概述

2.1 基于终端设备的碳排放监测方法

2.1.1 工业源碳排放监测方法

现有工业源碳排放监测主要有两种方法，一是手工核算法，二是 CEMS 法^[1]。手工核算法通过计算生产过程中的碳质量平衡或通过活动数据乘以排放因子，计算所涉及温室气体的排放量。CEMS 法可以直接测量烟气流速和烟气中的 CO₂ 浓度，以此计算温室气体的排放量。

1) 手工核算法

手工核算法通过将相关领域物料所产生的排放量进行累加以求取碳排放总量，不同领域的碳排放手工核算法需考虑物料的成分，主要包括化石燃料燃烧排放、工业生产过程排放、净购入电力排放和净购入热力排放^[12-18]。然而，手工核算法尚存在人为干扰多、误差大等缺点。

2) CEMS 法

CEMS 法在生产和排放设备等装置上安装抓取系统，并实时上报数据。该系统由气态污染物监测子系统、颗粒物监测子系统、烟气参数监测子系统和数据采集处理与通信子系统 4 个部分组成。监测子系统主要采用插入式向后散射红外光或激光测尘仪、电量测尘仪等。CEMS 能够实现碳排放核算的实时化、精准化与自动化，通过实时监测数据和大数据分析等手段，极大地提升碳排放核算数据的准确性与实时性。然而，CEMS 价格为百万级别，且后期维护成本较高。

2.1.2 自动监测技术

不同温室气体的自动监测技术见表 1。常见的自动监测技术主要包括气相色谱法、非分散红外

法、傅里叶变换红外光谱法、光腔衰荡光谱法、离轴积分腔输出光谱法和可调谐半导体激光吸收光谱法等，多种自动监测技术对比见表 2。这 6 种自动监测技术的具体原理如下。

1) 气相色谱法

气相色谱法^[19-21]能分离具有相似性质的物质，如同分异构体、同位素、对映体以及一些成分复杂的混合物（石油、受污染的水样等）。气相色谱法的原理是利用不同物质沸点、极性及吸附性质的差异实现混合物的分离。气相色谱法具有较高的灵敏度和可重复性，但其对工作标气的需求量较大，且对环境温度较为敏感。

2) 非分散红外法

在红外波段，一些具有非对称双原子或多原子分子结构的气体（如 CH₄、CO、CO₂、SO₂、NO 等）具有特征吸收光谱。不同气体的浓度与其对应的特征光谱吸收强度相关，利用这一原理可以检测气体

的浓度^[22-23]。非分散红外法原理简单、设备成本低，是目前监测 CO₂ 的常见方法之一。

3) 傅里叶变换红外光谱法

傅里叶变换红外光谱仪是一种干涉型光谱仪，以光的相干性原理为基础，主要由光源（硅碳棒、高压汞灯）、检测器、干涉仪、计算机构成。通过迈克尔逊干涉仪实验测量得到原始光谱与光源干涉图，再由计算机进行傅里叶变换获取光谱图，换算为气体浓度。傅里叶变换红外光谱法易受气体吸收光程的影响，可实现多种气体同时检测^[24]。

4) 光腔衰荡光谱法

光腔衰荡光谱仪主要由光源和衰荡腔组成。测量气体内存在吸收介质和不存在吸收介质时的衰荡时间不同，根据此差异即可求取被测介质的浓度^[25-26]。光腔衰荡光谱法的检测精度极高且稳定性较好，但其设备价格及运维成本较为昂贵^[27]。

表 1 不同温室气体的自动监测技术

对比项	大气	固定污染源废气	所需传感器/检测器
CO ₂	非分散红外法 傅里叶变换红外光谱法 光腔衰荡光谱法	非分散红外法 傅里叶变换红外光谱法 离轴积分腔输出光谱法 可调谐半导体激光吸收光谱法	红外二氧化碳传感器 催化二氧化碳传感器 热传导二氧化碳传感器
CH ₄	气相色谱法 非分散红外法 傅里叶变换红外光谱法	气相色谱法 非分散红外法 傅里叶变换红外光谱法 离轴积分腔输出光谱法 可调谐半导体激光吸收光谱法	红外甲烷传感器
N ₂ O	非分散红外法 傅里叶变换红外光谱法 光腔衰荡光谱法	非分散红外法 傅里叶变换红外光谱法	红外一氧化二氮传感器 量子级联激光一氧化二氮分析仪
含氟等其他温室气体	气相色谱法	气相色谱法	氟气传感器

表 2 多种自动监测技术对比

自动监测技术	适用场景	优点	缺点
气相色谱法	常用于检测 CH ₄	具有较高的灵敏度和重复性	对载气、助燃气和工作标气需求较大 易受环境温度影响
非分散红外法	常用于检测 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	原理简单、成本低 测量 CO ₂ 精度较高	测量 CH ₄ 、N ₂ O 精度较低
傅里叶变换红外光谱法	常用于检测浓度较小范围内的 CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	可实现多组分同时检测	检测下限易受到气体吸收光程的影响
光腔衰荡光谱法	常用于检测 CO ₂ 、N ₂ O	精密度最高、稳定性好	仪器价格和运维成本昂贵
离轴积分腔输出光谱法	常用于检测废气中的 CO ₂ 、N ₂ O，以及勘探深海可燃冰	灵敏度高、响应时间快	系统噪声较大 频率调制技术装置比较复杂
可调谐半导体激光吸收光谱法	常用于检测含氟温室气体及有毒有害气体等	高灵敏度 检测速度快 可实现多组分同时检测	易受测量环境温度影响

5) 离轴积分腔输出光谱法

离轴积分腔输出光谱技术是一种基于光学谐振腔的腔增强光谱技术。通过测量和比较入射光和透射光的强度,即可得到样本中目标气体的浓度^[28]。离轴积分腔输出光谱法的系统噪声较大,但其检测灵敏度高、响应时间快,在工业废气中 CO₂、N₂O 检测和深海可燃冰勘探方面具有广泛应用^[29-30]。

6) 可调谐半导体激光吸收光谱法

该方法以半导体激光器的高单色性为基础,测量待测气体分子的孤立吸收谱线,避免了不同分子光谱的交叉干扰,从而准确鉴别出待测气体^[31]。可调谐半导体激光器较窄的线宽以及波长可随所注入电流大小而变化的特点赋予了可调谐半导体激光吸收光谱法高灵敏度、实时、动态、可分组同时测量等优点,常用于含氟温室气体及有毒有害气体检测等^[32]。

2.2 基于物联网的碳排放监测方法

随着物联网技术的发展,物联网终端设备的数量近年来呈爆炸式增长趋势,全球活跃的物联网终端设备数量已超过 500 亿个。物联网技术已广泛应用于电子医疗、智能家居、电动汽车、机器人、智慧医疗、智慧农业等诸多领域,相较于传统基于终端设备的碳排放监测方法,其结构清晰、设计灵活、传输可靠等特性为碳排放监测提供了一种新方式。

现有的基于物联网的监测方案大多采用轻量级的微处理器(如 STM32、ATtiny、ATmega 单片机等^[33-36])作为主控模块,用来管控多种传感器并处理数据等。各种设备间通常采用短距离无线通信技术,如 ZigBee、Wi-Fi、蓝牙等^[33-39]。

此外,考虑不同应用场景的特征,研究学者也分别设计相应的监测体系及平台,实现不同场景的碳排放评估^[40-43]。例如,针对城市交通环境,段仲渊等^[40]设计了一种碳排放监测平台,通过获取交通道路上行驶的各种机动车的运行状态和车辆类型,有机结合交通流量以对道路交通的排放量与排放源进行科学评估。针对畜牧养殖场景,徐巧年等^[41]提出了一种基于物联网的养殖基地监测架构,通过设计相应感知节点检测环境温度、湿度、CO₂ 浓度等指标,利用 ZigBee 技术发送信号,实现智能牧场的碳排放监测与评估。针对生物健康监测场景,Al-Zinati 等^[42]提出了一种基于雾节点的新型生物监测架构,通过分配相应的数据监测区域给对应的雾节点,有效应对高动态变化的环境,将数据聚合

并检测潜在的生物健康威胁。针对水环境监测方面,林彦廷等^[43]采用 ZigBee 通信技术设计了一种水环境监测的物联网系统,用来监测水体温度、大气压强和水质酸碱值等信息,该系统适用于河流、湖泊、沼泽等多种水环境。

目前,基于物联网的碳排放监测方法研究仍处于起步阶段,现有研究大多只针对有限区域的环境监测,如城市交通环境中的车辆尾气排放监测^[41]以及养殖牧场环境中的环境监测^[42]等,其覆盖范围有限,且数据处理和决策任务较为简单。此外,现有研究大多采用 Wi-Fi 和 ZigBee 等通信技术实现数据传输,仅能满足小规模、有限范围且数据量较低的通信需求。我国地域辽阔、监测设备数量庞大、各类监测数据繁杂,对碳排放监测网络的数据处理和传输等提出更高要求。因此,为支撑我国碳交易市场的公平、高效运行,研究具有广覆盖、高精度、实时决策等特征的新型碳排放监测网络具有重要意义。

3 物联网架构的碳排放监测体系

3.1 存在问题与未来需求

我国地域辽阔,碳排放源种类繁多,尽管学术界与工业界已存在一些基于物联网技术的碳排放监测方案,但现有方法对大气环境温室气体的监测能力仍存在一定局限性,碳排放监测技术体系仍有待完善。目前,我国碳排放监测存在的主要问题如下。

1) 现有监测站点大多位置偏远,运维成本很高。例如,我国境内现有唯一一个全球大气本底站设在青海瓦里关,现有 6 个区域本底站分设在北京上甸子、浙江临安、黑龙江龙凤山、新疆阿克达拉、云南香格里拉和湖北金沙^[44],现场采集与存储数据的工作量大,交通不便,设备运维成本高。近 5 年,依托我国生态环境部,用于开展大气背景值监测的背景站年运维成本(不含南沙、西沙地区)约为 800 万元/年^[4]。

2) 现有企事业单位的碳排放计算方法大多采用手工核算法,且核算精度较低。例如,2020 年中国电力企业联合会开展了火电厂烟气 CO₂ 排放连续监测技术研究,其结果显示,手工核算法与 CEMS 法结果相对偏差为 10%~16%^[45]。并且,手工核算法无法实现实时、动态的碳排放监测,无法获得时间连续、空间覆盖合理的科学碳排放数据。

3) 碳排放监测数据的采集、传输、分析仍采用自下而上的“核算-统计”方式,由企事业单位上

报,县、市、省、国家汇总,尚未形成完善的网络体系。碳交易系统海量数据传输的低时延性、安全性无法得到保障。

4) 我国碳交易市场规模庞大,截至 2021 年 8 月,全国碳排放权交易市场运营已超过一个月。开市一个月来,排放配额累计成交量为 702 万吨,成交额为 3.55 亿元,该履约周期只纳入了 2 162 家发电行业重点排放单位。在“十四五”期间,石油、化工、钢铁、建材等八大重点能耗行业也将被纳入碳交易市场,控排企业约有 10 000~12 000 家。面对如此巨大的碳交易市场,仅依靠手工核算、点对点报告统计的数据收集与处理方式,无法支持未来我国碳交易市场的有效运行。

我国碳交易系统的开市、运行机制与证券交易相似,其对碳排放数据的实时性与可靠性提出了较高的要求,低时延、安全可靠的数据采集、传输与处理是碳交易系统运行的保障。因此,如何建立精准、高效的统一碳排放监测系统,支撑我国碳交易市场安全、公平、高效运转,具有重要的理论价值与现实意义。

3.2 基于“云-管-边-端”物联网架构的碳排放监测体系

随着经济的发展,智能化、信息化逐渐成为环保工作的未来趋势,结合物联网技术设计的温室气体排放智能监测技术,提高了环境监测的实时性与有效性,通过辅助决策实现信息共享,为环保工作提供了新技术与新思路,拓宽了物联网下温室气体监测技术的应用前景。

全国性的碳监测系统将涵盖石油、化工、钢铁、建材、电力等八大重点行业,数据资源多源异构,存在种类多、格式杂、兼容难等问题。过程控制统一架构的对象、链接和嵌入(OPC-UA, object linking and embedding for process control unified architecture)能提供一个完整、安全可靠、独立于设备、跨平台的信息架构,实现原始碳监测数据从不同行业、不同地区、多种类监测设备到处理设备的传输。构建基于 OPC-UA 的统一数据调用接口与信息模型,设计基于 OPC-UA 的现场级异构设备一体化建模方法,为实现全国性碳监测异构设备标准化管理和高效互联互通奠定基础。

此外,全国范围内众多的碳排放源与监测项目导致规模庞大的监测终端产生了海量的监测及感知数据,这些大容量数据不仅对存储、传输和处理

的基础设施提出了挑战,也对服务架构提出了低时延、高可靠、高性能和隐私安全等新要求。通过在物联网终端设备和云计算中心之间部署网络边缘层,并在边缘端存储并处理部分原始数据,降低云计算中心的压力,构建“云-管-边-端”物联网架构可有效缓解带宽资源紧张、处理实时性差的问题,从而提高碳排放监测效率。

3.2.1 OPC-UA 统一通信模型

OPC-UA 是由国际组织对象链接与嵌入的过程控制(OPC, object linking an embedding for process control)基金会管理的一个工业标准,是一套安全、可靠且独立于制造商和平台并用于工业通信的数据交互规范。OPC-UA 可以满足各类设备的信息在不同厂商和设备的硬件之间交换,为应用之间提供透明的数据访问,提高系统的开放性和可操作性^[46-47]。

针对全国范围碳监测系统数据来源种类多、格式繁杂、设备兼容难等问题,构建基于 OPC-UA 的统一数据调用接口与信息模型,支持复杂碳排放数据采集网络场景下以太网、工业现场无线网络等多种通信协议的高效互联集成,实现碳排放监测设备、数据和操作人员等监测系统要素的全流程泛在感知与异构数据共网传输。

为实现现场级碳监测系统异构设备的高效互联互通,基于 OPC-UA 统一通信模型组件应处于数据收集层和数据处理控制层之间。该组件对下能接收和发送用各种协议封装的数据给碳监测设备,对上能将不同协议转换成 OPC-UA 统一模型接入控制网络。为此,该统一模型必须具有协议的识别、转换、传输与解析等功能^[48]。

基于 OPC-UA 的统一通信模型能够安全、可靠地将各类碳监测设备的原始数据及预处理后的信息传输给各类控制系统,实现全国范围内碳监测系统各个环节数据的横向与纵向透明交互。OPC-UA 不与专有技术或设备厂商绑定,为智能设备提供了广范围交互的可行性。同时,OPC-UA 提供信息建模功能,在实现互联互通的基础上进一步促进了语义互操作性的实现。

3.2.2 融合基于 OPC-UA 的统一通信模型的“云-管-边-端”碳排放监测体系

融合基于 OPC-UA 的统一通信模型,本文基于“云-管-边-端”物联网架构提出一种新型碳排放监测体系,融合基于 OPC-UA 的统一通信模型的

“云-管-边-端”碳排放监测体系架构如图 2 所示。“云”是指物联网云平台，“管”是指有线/无线通信方式，“边”是指边缘计算，“端”则涵盖了智能传感、智能终端和智能设备。

所提出融合基于 OPC-UA 的统一通信模型的“云-管-边-端”碳排放监测体系主要有如下 4 个特性。

1) 统筹协调在云端

碳排放监测终端的无差别采集产生了大量原始冗余数据，使云端聚集了大量的数据和处理任务，对云计算中心的计算能力提出了极高要求。为实现全覆盖、高精度、实时处理的碳监测网络，云计算中心承担数千万亿次/秒的计算需求。为此，如果能够通过边缘赋能将云端的部分任务下放至边缘侧，实现碳监测边缘侧部分数据的集成和自主决策，以及云计算中心与边缘服务器的优化和决策互动，是克服当前实际挑战的重要思路。

在所提出的基于“云-管-边-端”的碳排放监测架构中，云计算中心通过“管道”通信系统收集部分关键终端设备采集的信息和边缘服务器处理后的区域信息，利用区块链、大数据挖掘、人

工智能等技术进行数据清洗、建模、分类、分析等。由此，云计算中心可获取全球网格化的碳排放数据，用于分析碳排放的全局性分布和季节性变化等特征并预测碳排放的未来变化趋势等。云计算中心利用这些数据信息，统筹制定基准碳价、宏观调控碳配额，并将这些决策信息通过“管道”通信系统下传给边缘服务器，再由边缘服务器根据各自所管理区域的特点适度调整，实现云计算中心与边缘服务器的决策互动，完成云计算中心统筹协调的功能。

通过构建全局资源调度和协同优化方法，将云端决策推向服务边缘和数据产生的源头，即可以极低的时延满足碳排放数据传输的高实时性需求，并将复杂的任务需求分阶段在“云-边-端”各处完成，缩减计算开销、降低带宽压力，便于碳交易市场根据实时的碳排放数据对制定碳价、发放配额进行统筹协调。

与边缘服务器相比，云计算中心作为决策中心，存储全局区域全部的数据信息，具有统筹基准碳价、调控各区域碳配额等责任，以均衡各区域经济发展和碳排放权的差异性、避免恶性竞争，从而支持国家碳交易市场的公平、高效运行。

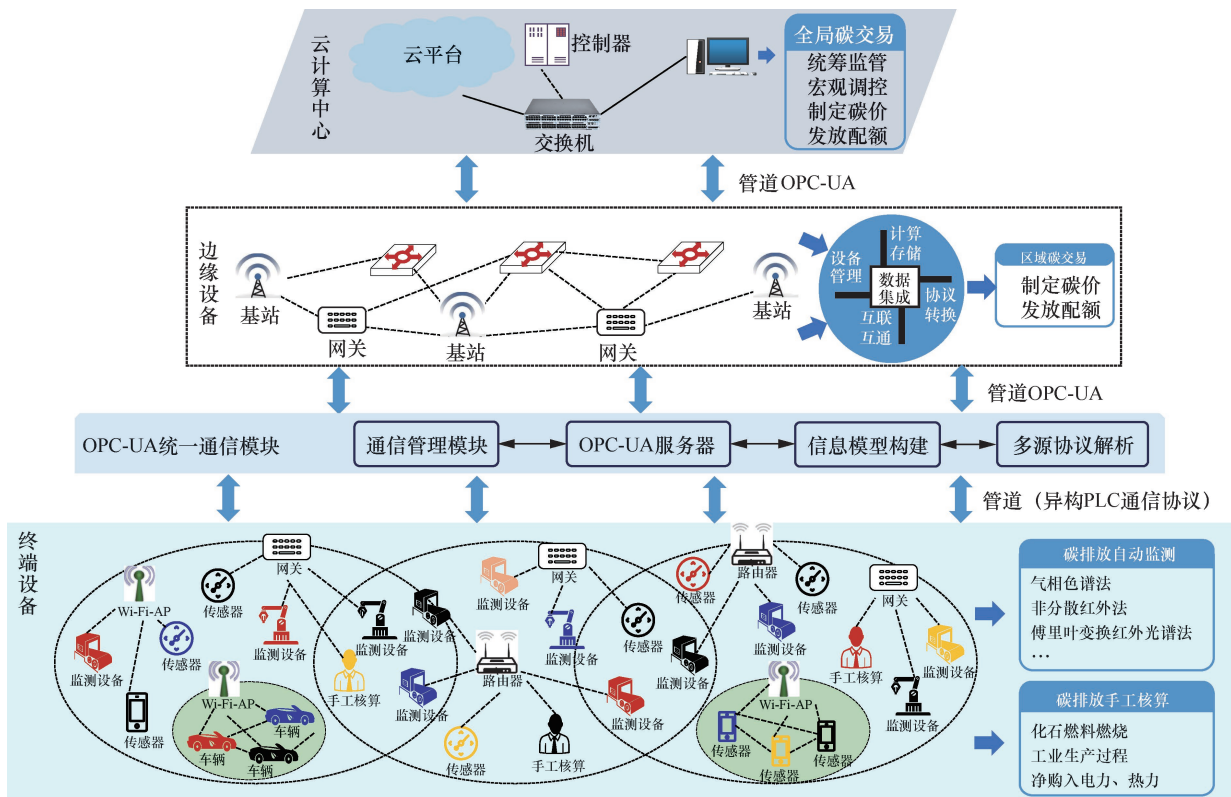


图 2 融合基于 OPC-UA 的统一通信模型的“云-管-边-端”碳排放监测体系架构

2) 可靠传输在管道

在新兴的“云-管-边-端”架构中,从云到边、端,以及边到端之间的连接都可算作“管”。“管道”通信系统是“云-管-边-端”物联网架构的基础,数据的可靠传输是终端、边缘服务器、云计算中心之间互联互通的基本保障。为支撑碳交易市场的高效运行,碳监测数据需具有全覆盖性、实时性、及时性、准确性,因此需要高可靠、低时延、大容量的通信系统以满足海量碳监测数据的传输需求。

在所提出的架构中,“管道”通信系统拟采用光纤通信和无线射频通信相结合的方式。边缘服务器与云计算中心、终端网关与边缘服务器、基站与服务器等设备之间可采用光纤通信方式,支持大数据量、长距离业务的可靠传输。终端与终端设备、终端设备与邻近基站之间可采用无线射频通信,支持实时性、小数据量业务。其中,终端与终端设备之间,可采用 Wi-Fi 等无线通信和 LoRa 等低功耗物广域物联网(LPWAN, low-power wide-area network)通信技术,扩大设备间的通信范围并降低设备通信能量消耗;终端设备与邻近基站之间,可采用 5G 通信技术中毫米波、大规模多输入多输出(MIMO, multiple input multiple output)等技术,增大系统通信容量、降低干扰,保证碳监测数据的可靠传输。

在终端设备层,可编程逻辑控制器(PLC, programmable logic controller)对碳监测设备进行数据采集和指令控制,不同厂商的 PLC 通过其特有的通信协议与 OPC-UA 统一信息模块进行数据传输。OPC-UA 模块收到碳排放数据后,通过对不同厂商 PLC 的异构通信协议进行精准化解析,将获取到的异构碳监测设备的数据映射到 OPC-UA 服务器的地址空间中,将设备对象、设备数据和设备控制指令分别映射成 OPC-UA 信息模型中的对象节点、变量节点和方法节点,以及对外提供统一的数据访问接口。最后,通过构建的统一通信管理模块,位于上层的云控制平台和边缘设备可以通过 OPC-UA 通信协议与底层终端碳监测设备实现数据交互、异构设备数据采集与监测、远程灵活控制以及安全传输等功能。

针对异构碳监测终端中不同厂商 PLC 的多源异构通信协议和传输数据,从数据信源分类的角度,OPC-UA 采用物理层软切换方法,根据信源类

型和业务数据分布情况选取接入方式,以灵活适配碳监测系统的异构数据传输需求;同时,根据异构数据的多种协同处理需求,OPC-UA 将不同数据源、数据格式的数据按照优先级进行逻辑或物理整合、封包,并为上层提供一个统一的数据通信接口,屏蔽底层数据的差异,从而不必再考虑底层数据模型、数据格式等因素。针对多源异构通信协议的实时转换需求,OPC-UA 利用无线数据包经过转换器内部数据包的拆分、组装和队列管理算法,将异构数据封装成统一数据帧格式;然后利用隧道技术,在数据头部加入隧道帧头,在数据传输过程中无须进行多次数据帧头的转换,从而实现多种协议的快速转换和传输技术,降低了时延,实现了异构数据的实时传输。

通过构建 OPC-UA 统一通信模块,为不同设备数据在异构网络中传输提供协议转换的保障,自动适配多协议切换,实现通信协议的统一管理。

3) 高效运行在边缘

我国地域辽阔,各类监测设备和监测数据数量庞大,在“十四五”期间,拟将八大重点能耗行业、10 000~12 000 家企业纳入碳监测网络。在“云-管-边-端”的碳监测体系架构中,通过在云计算中心和终端设备之间添加一层边缘服务器,将庞大的监测数据依据地理区域分割成更小的、更容易分析处理的数据单元。作为中心云平台计算能力的下沉,边缘服务器也拥有存储、计算、分析等能力,从而将网络转发、存储、计算等工作安排在距离终端最近的边缘侧处理。通过采用轻量级的数据分析与处理技术,边缘服务器可实现不依赖于云中心的本地化存储、管理和分析数据,从而减轻中心云端压力,降低管道带宽成本。

在所提出的基于“云-管-边-端”碳监测体系架构中,边缘服务器根据云计算中心下传的全局基准碳价和碳配额以及所管理区域的碳排放、经济发展状况等区域特点,适度调整碳价和碳配额,并将调整后的碳价和碳配额下传至区域内的碳排放企业、监测部门等;同时,边缘服务器收集区域内各个监测设备采集的碳排放数据,进行数据处理及分析,并实时调整区域内的碳价和碳配额。边缘服务器定期将处理后的碳监测数据以及调整后的碳价和碳配额上传至云计算中心,接受云计算中心的统筹协调和监管,实现边缘侧的数据高效处理和区域设备的高效管控。采用轻量级、高

效的边缘技术，有利于全网调度和算力分发，辅助云端碳交易市场完成统筹协调，对来自监测设备的碳排放数据进行实时操作，并在本地进行结果预测，从而降低时延并提供更快的响应，支持碳交易市场的高效运行。

与云计算中心相比，边缘服务器只负责区域内企业和监测部门的管控以及区域内监测设备的数据收集与处理。边缘服务器与云计算中心保持紧密联系，将收集并处理后的监测数据和调整后的碳价和碳配额等决策信息上传给云计算中心，同时也接收云计算中心统筹协调后的基准碳价和碳配额等决策信息，与云计算中心实现决策互动。

4) 简洁体验在终端

随着通信技术的迅猛发展和互联网的大规模普及，通过形式多样的多媒体终端智能化呈现信息内容与服务已成为信息通信技术发展的显著特征。我国终端碳排放监测设备异构，针对不同场景和不同需求，可采用多种方法/设备监测气体。这些异构设备操作交互难、协议兼容差，可以借鉴当前强大的处理器和开放的操作系统，设计并研制智能化、高效集成的碳排放终端监测系统及设备，从而完成综合化、专业化的终端碳排放监测。

一方面，借助现有集成电路和微处理器设计能力，未来终端监测设备将呈现更高的集成性和更高效的处理性能。另一方面，快速发展的开源操作系统为终端监测设备的专业化和统一化提供了实现基础。未来终端监测设备在统一开源操作系统的基础上进行研发，可减小各类监测设备之间的操作差异性、提高不同监测设备与边缘服务和通信系统的协议兼容性，从而简化并统一终端设备的操作流程、提高设备管理人员的工作体验。统一化、集成化的终端设备更有利于大规模终端监测设备的部署、提高碳监测网络的运行效率。

为实现上述4个层面的建设，基于“云-管-边-端”碳排放监测系统中的潜在关键技术如图3所示。在区块链、大数据挖掘、OPC-UA、机器学习等新技术的支持下，通过“云-管-边-端”4个层面的建设，实现碳排放监测系统在任何时间、地点、人、物之间的信息连接和交互，产生共享数据，为碳排放企业、监测用户、设备维护商、碳交易市场、政府等提供服务，实现高精度、广覆盖的碳排放监测，支持我国碳交易市场的高效运转，从而建立高效碳排放监测业务体系。

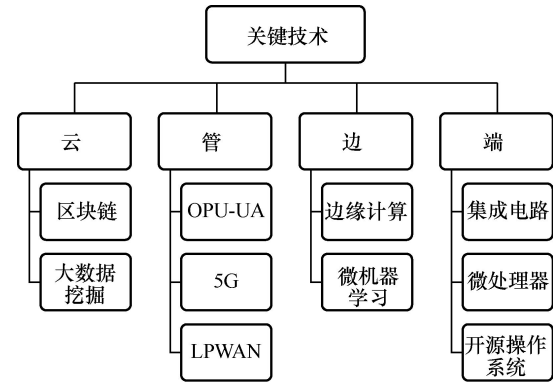


图3 基于“云-管-边-端”碳排放监测系统中的潜在关键技术

4 结束语

碳排放监测是支持碳交易市场高效稳定运行的重要支撑技术。本文回顾了国内外碳排放监测的进程和相关标准，归纳了现有工业源碳排放监测方法和温室气体自动监测技术及原理。针对我国地域辽阔、监测设备数量庞大等特点，提出了基于“云-管-边-端”物联网架构的碳排放监测体系，为实现高精度、广覆盖的碳排放监测与评估奠定了基础。针对碳监测需求，本文提出的基于“云-管-边-端”物联网架构仅是一种设想，旨在对未来碳排放监测相关研究提供一定参考，后续仍需要实验验证所提架构的可行性与有效性。

参考文献：

- [1] 潘晓滨, 朱旭. 我国碳排放许可制的必要性分析[J]. 资源节约与环保, 2021(1): 144-145.
PAN X B, ZHU X. Analysis on the necessity of carbon emission permit system in China[J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2021(1): 144-145.
- [2] 刘佳, 余星, 鞠学泉. 关于建立上海市碳排放监测、报告体系的设想[J]. 上海节能, 2014(2): 12-18.
LIU J, YU X, JU X Q. Conceiving of Shanghai's building carbon emission monitoring and reporting system[J]. Shanghai Energy Conservation, 2014(2): 12-18.
- [3] 任亚运, 傅京燕. 碳交易的减排及绿色发展效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5): 11-20.
REN Y Y, FU J Y. Research on the effect of carbon emissions trading on emission reduction and green development[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(5): 11-20.
- [4] 李鹏, 吴文昊, 郭伟. 连续监测方法在全国碳市场应用的挑战与对策[J]. 环境经济研究, 2021, 6(1): 77-92.
LI P, WU W H, GUO W. The challenges and recommendations of application of the measurement-based monitoring methodology in national carbon market[J]. Journal of Environmental Economics, 2021,

- 6(1): 77-92.
- [5] US EPA. Mandatory reporting of greenhouse gases final rule[R]. 2009.
- [6] 孙天晴, 刘克, 杨泽慧, 等. 国外碳排放MRV体系分析及对我国的借鉴研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S1): 17-21.
SUN T Q, LIU K, YANG Z H, et al. Analysis and reference of foreign carbon emissions MRV system to China[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(S1): 17-21.
- [7] 董文福, 刘泓汐, 王秀琴, 等. 美国温室气体强制报告制度综述[J]. 中国环境监测, 2011, 27(2): 18-22.
DONG W F, LIU H X, WANG X Q, et al. Review of mandatory reporting of greenhouse gases in America[J]. Environmental Monitoring in China, 2011, 27(2): 18-22.
- [8] 周颖, 张宏伟, 刘兰翠, 等. 欧盟和美国温室气体排放监测对中国的借鉴意义[J]. 中国环境监测, 2013, 29(5): 1-5.
ZHOU Y, ZHANG H W, LIU L C, et al. The green house gas monitoring in EU and America and their significance as reference to China[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(5): 1-5.
- [9] 滕飞, 冯相昭. 日本碳市场测量、报告与核查系统建设的经验及启示[J]. 环境保护, 2012, 40(10): 72-74.
TENG F, FENG X Z. The experience and enlightenment of Japan's carbon market measurement, reporting and verification system construction [J]. Environmental Protection, 2012, 40(10): 72-74.
- [10] 全国碳排放管理标准化技术委员会. 温室气体排放核算与报告要求: 煤炭生产企业: GB/T 32151.11-2018[S]. 2018.
National Technical Committee on Carbon Emission Management of Standardization Administration. GHG emission accounting and reporting requirements: coal producing enterprises: GB/T 32151.11-2018[S]. 2018.
- [11] 全国碳排放管理标准化技术委员会. 温室气体排放核算与报告要求: 纺织服装企业: GB/T 32151.12-2018[S]. 2015.
National Technical Committee on Carbon Emission Management of Standardization Administration. GHG emission accounting and reporting requirements: textile and garment enterprise: GB/T 32151.12-2018[S]. 2018.
- [12] 高春艳, 牛建广, 王斐然. 钢材生产阶段碳排放核算方法和碳排放因子研究综述[J]. 当代经济管理, 2021, 43(8): 33-38.
GAO C Y, NIU J G, WANG F R. Review of carbon emission accounting methods and carbon emission factor in steel production[J]. Contemporary Economic Management, 2021, 43(8): 33-38.
- [13] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17-24.
YU B Y, ZHAO G P, AN R Y, et al. Research on China's CO₂ emission pathway under carbon neutral target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23(2): 17-24.
- [14] 田文爽, 李欣, 白鹏翔. 流程模拟技术在合成氨工业 CO₂ 排放核算中的应用[J]. 石油石化绿色低碳, 2020, 5(6): 69-74.
TIAN W S, LI X, BAI P X. Application of process simulation in CO₂ emission accounting of ammonia industry[J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2020, 5(6): 69-74.
- [15] 姚聪林, 朱红春, 姜周华, 等. 全废钢连续加料电弧炉短流程碳排放计算及分析[J]. 材料与冶金学报, 2020, 19(4): 259-264.
YAO C L, ZHU H C, JIANG Z H, et al. CO₂ emissions calculation and analysis of electric arc furnace with continuous feeding of only scrap[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2020, 19(4): 259-264.
- [16] 黄小菲. 能源产业结构优化研究[J]. 产业创新研究, 2020(22): 76-78.
HUANG X F. Research on energy industry structure optimization[J]. Industrial Innovation, 2020(22): 76-78.
- [17] 王霖晗, 朱林, 张晶杰, 等. 欧盟火电厂二氧化碳排放在线监测系统质量保证体系对中国的启示[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 154-158, 176.
WANGM H, ZHU L, ZHANG J J, et al. Practice of quality assurance system of carbon dioxide emission on-line monitoring system in the European union[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 154-158, 176.
- [18] 王小龙, 王强, 王小峰, 等. 燃煤电厂关键排放因子对碳排放量影响研究[J]. 山东化工, 2019, 48(23): 239-243.
WANG X L, WANG Q, WANG X F, et al. A study on the influence of key emission factors of coal-fired power plant on carbon emission[J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(23): 239-243.
- [19] 王芹, 冯景春, 冯开. 气相色谱法及其在应用[J]. 广东化工, 2014, 41(12): 202, 208.
WANG Q, FENG J C, FENG K. Gas chromatography and its application[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(12): 202, 208.
- [20] 袁超, 何保山, 韩小贤, 等. 二氧化碳气体检测研究进展[J]. 江西农业学报, 2009, 21(6): 133-136, 140.
YUAN C, HE B S, HAN X X, et al. Research advance in detection of carbon dioxide[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2009, 21(6): 133-136, 140.
- [21] 徐寅. 气相色谱法在大气污染监测中的运用[J]. 绿色科技, 2017(8): 89-90.
XU Y. Application of gas chromatography in air pollution monitoring[J]. Journal of Green Science and Technology, 2017(8): 89-90.
- [22] 刘顺, 张慧丽. 一氧化碳非分散红外法性能指标确定方法的探讨[J]. 环境保护与循环经济, 2019, 39(2): 74-76.
LIU S, ZHANG H L. Discussion on determination method of performance index of carbon monoxide nondispersive infrared method[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2019, 39(2): 74-76.
- [23] 袁博, 袁宇鹏, 张祖伟, 等. 基于差分吸收检测技术的非分散红外 CO₂ 呼吸气体传感器[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 118-125.
YUAN B, YUAN Y P, ZHANG Z W, et al. Non-dispersive infrared CO₂ breathing gas sensor based on differential absorption detection technology[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(1): 118-125.
- [24] 周阳, 尹强, 毛沅文, 等. 傅里叶变换红外光谱法测定食品添加剂二氧化碳中的二氧化氮[J]. 化学分析计量, 2020, 29(S1): 27-30.
ZHOU Y, YIN Q, MAOY W, et al. Determination of nitrogen dioxide in food additive carbon dioxide by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2020, 29(S1): 27-30.

- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 大气二氧化碳(CO₂)光腔衰荡光谱观测系统: GB/T 34415—2017[S]. 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Cavity ring-down spectroscopy system for measurement of atmospheric carbon dioxide: GB/T 34415—2017[S]. 2017.
- [26] 王星, 周泽义. 基于光腔衰荡光谱法测量CO₂结果的不确定度分析[J]. 计量技术, 2016(11): 3-6.
WANG X, ZHOU Z Y. Uncertainty analysis of CO₂ measurement results based on optical cavity ring-down spectroscopy [J]. Measurement Technique, 2016(11): 3-6.
- [27] 李青原, 李静, 魏鑫, 等. 基于光腔衰荡光谱的便携式呼气异戊二烯分析仪性能评估[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2415-2419.
LI Q Y, LI J, WEI X, et al. Performance evaluation of a portable breath isoprene analyzer based on cavity ringdown spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2415-2419.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 温室气体二氧化碳测量离轴积分腔输出光谱法: GB/T 34286—2017[S]. 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Greenhouse gas—Carbon dioxide measurement—Off-axis integrated cavity output spectroscopy method: GB/T 34286—2017[S]. 2017.
- [29] 董洋, 王静静, 周心禹, 等. 基于离轴积分腔输出光谱的深海可燃冰探测技术[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0811003.
DONG Y, WANG J J, ZHOU X Y, et al. Detection of methane hydrate in deep sea based on off-axis integrated cavity output spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0811003.
- [30] 周子昕, 黄印博, 卢兴吉, 等. 再入射离轴积分腔输出光谱干涉噪声处理方法[J]. 量子电子学报, 2019, 36(6): 651-657.
ZHOU Z X, HUANG Y B, LU X J, et al. Method of suppressing interference noise for re-injection off-axis integrated cavity output spectroscopy[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2019, 36(6): 651-657.
- [31] 宋雪梅, 刘建国, 张玉钧, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱法监测二氧化碳的通量[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(1): 184-187.
SONG X M, LIU J G, ZHANG Y J, et al. Monitoring the flux of carbon dioxide gas with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(1): 184-187.
- [32] 祝仰坤. 波长调制吸收光谱的关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHU Y K. Research on key technology of wavelength modulation spectroscopy[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [33] 朴植. 基于STM32的物联网通用中继节点的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
PIAO Z. The design and implementation of IoT gateway based on STM32[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [34] 毛明健. 环境监测物联网关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
MAO M J. Research on key technologies of internet of things for environment monitoring[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [35] LAZARESCU M T. Design of a WSN platform for long-term environmental monitoring for IoT applications[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2013, 3(1): 45-54.
- [36] WU F, RÜDIGER C, YUCEM R. Real-time performance of a self-powered environmental IoT sensor network system[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(2): 282.
- [37] TANG J, DONG T T, LI L H, et al. Intelligent monitoring system based on internet of things[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102(2): 1521-1537.
- [38] FUERTES W, CARRERA D, VILLACÍS C, et al. Distributed system as internet of things for a new low-cost, air pollution wireless monitoring on real time[C]//Proceedings of 2015 IEEE/ACM 19th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT). Piscataway: IEEE Press, 2015: 58-67.
- [39] IBRAHIM M, ELGAMRI A, BABIKER S, et al. Internet of things based smart environmental monitoring using the Raspberry-Pi computer[C]//Proceedings of 2015 Fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 159-164.
- [40] 段仲渊. 城市交通排放监测平台建设与应用[J]. 交通与运输, 2019, 32(S1): 154-159.
DUAN Z Y. Construction and application of urban traffic emission monitoring platform[J]. Traffic & Transportation, 2019, 32(S1): 154-159.
- [41] 徐巧年. 基于物联网的肉羊养殖基地环境监测系统设计[J]. 信息技术与信息化, 2020(9):34-36.
XU Q N. Design of environmental monitoring system for Mutton sheep breeding base based on internet of things[J]. Information Technology and Informatization, 2020(9): 34-36.
- [42] AL-ZINATI M, ALRASHDAN R, AL-DUWAIIRI B, et al. A re-organizing bio surveillance framework based on fog and mobile edge computing[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(11): 16805-16825.
- [43] 林彦廷. 基于无线传感器技术的水环境监测系统设计与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
LIN Y T. Design and implementation of water environment monitoring system based on wireless sensor technology[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [44] 周凌晔, 刘立新, 张晓春, 等. 我国温室气体本底浓度网络化观测的初步结果[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 641-645.
ZHOU L X, LIU L X, ZHANG X C, et al. Preliminary results on network observation of greenhouse gases at China GAW stations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(6): 641-645.
- [45] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2016[J]. 电器工

业, 2016(9): 18-23.

China Electricity Council. Annual development report of power industry in China[J]. China Electrical Equipment Industry, 2016(9): 18-23.

[46] LAMAN, HAUGEN. Implementing OPC-UA services for industrial cyber-physical systems in service-oriented architecture[C]//Proceedings of IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2019: 5486-5492.

[47] LEE Y K, LEE S J, LEE H, et al. Implementation of distributed smart factory platform based on edge computing and OPC UA[C]//Proceedings of IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2019: 4235-4239.

[48] GROBMANN D, BREGULLA M, BANERJEE S, et al. OPC UA server aggregation—The foundation for an Internet of portals[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-6.

[作者简介]



邢方圆 (1991-), 女, 博士, 东南大学副研究员, 主要研究方向为物联网及无线通信网络。



贺诗波 (1983-), 男, 博士, 浙江大学教授, 主要研究方向为工业物联网、大数据网络科学、人工智能。



孙铭阳 (1988-), 男, 博士, 浙江大学研究员, 主要研究方向为低碳电力系统智能优化与决策、人工智能系统安全与隐私保护。



陈积明 (1978-), 男, 博士, 浙江大学教授, 主要研究方向为网络优化与控制、网络系统安全、工业大数据与物联网。