

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-944-06

# 建筑领域碳中和实现路径面临的计量挑战

董玉平<sup>1</sup> 汪洪军<sup>2</sup> 任歌<sup>2</sup> 费恺<sup>1</sup> 徐志<sup>1</sup>

(1. 北京城建亚泰建设集团有限公司 北京 100013;

2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

**【摘要】** 建筑领域的能源消耗是造成温室气体排放的重要因素之一,降低建筑领域碳排放对我国碳达峰与碳中和战略的实现具有重要意义。取消直接碳排放、协助减少电力和热力使用导致的间接碳排放、减少建造和维修用材的生产和运输导致的碳排放以及避免建筑空调制冷系统使用中非二氧化碳类温室气体的排放作为实现建筑领域碳中和的主要技术路径。分析表明,温室气体排放量的精准计量、建筑建材及设备节能检测、清洁能源发电及并网领域计量测试技术等众多计量问题已经成为建筑领域实现碳中和面临的重要技术瓶颈。因此,梳理并加快开展这些关键计量技术的研究和应用,是推动我国建筑领域技术进步和跨越式发展进而实现碳中和目标的必由之路。

**【关键词】** 计量学; 建筑领域; 碳中和; 碳排放; 建筑节能

中图分类号 TK01+8 文献标识码 A

## Measurement Challenges Faced by The Realization Path of Carbon Neutrality in the Construction Field

Dong Yuping<sup>1</sup> Wang Hongjun<sup>2</sup> Ren Ge<sup>2</sup> Fei Kai<sup>1</sup> Xu Zhi<sup>1</sup>

(1.Beijing Urban constructionYatai Group Co., Beijing, 100013;

2.National Institute of Metrology, Beijing, 100029)

**【Abstract】** Energy consumption in the construction field is one of the important factors causing greenhouse gas emissions. Reducing carbon emissions in the construction field is of great significance to the realization of China's carbon peak and carbon neutralization strategy. Eliminate direct carbon emissions, assist in reducing indirect carbon emissions caused by the use of electricity and heat, reduce carbon emissions caused by the production and transportation of construction and maintenance materials, and avoid the emission of non carbon dioxide greenhouse gases in the use of building air conditioning and refrigeration systems as the main technical path to achieve carbon neutralization in the construction field. The research shows that many measurement problems, such as accurate measurement of greenhouse gas emissions, energy-saving detection of building materials and equipment, measurement and testing technology in clean energy power generation and grid connection, have become important technical bottlenecks for carbon neutralization in the construction field. Therefore, combing and accelerating the research and application of these key measurement technologies is the only way to promote the technological progress and leapfrog development in China's construction field, so as to achieve the goal of carbon neutralization.

**【Keywords】** metrology; construction field; carbon neutrality; carbon emissions; building energy conservation

## 0 引言

近年来,全球气候变暖趋势急剧加速,2020

年全球平均表面温度(GMST)比工业化前的基线高(1.2±0.1)℃,使2020年成为有记录以来最热

基金项目:院自主立项科研项目(课题编号:26-ZYZJ2101)

作者简介:董玉平(1977-),女,硕士,高级工程师,硕士生导师,研究方向为实验室建设与管理,E-mail:dongyup@126.com

通讯作者:汪洪军(1978-),男,硕士,高级工程师,硕士生导师,研究方向为计量测试技术及应用,E-mail:whj@nim.ac.cn

收稿日期:2022-07-20

的3年之一<sup>[1]</sup>。全球变暖对生态系统和人类社会产生了严重影响<sup>[2-4]</sup>。全球气候变化的最大原因之一是二氧化碳等温室气体排放<sup>[5]</sup>。因此,为减缓全球气候变化,各国先后提出了以碳中和为目标的应对气候变化战略,2020年9月,习近平主席提出我国二氧化碳排放力争2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和<sup>[6]</sup>。

建筑领域的能源消耗是造成温室气体排放的重要因素之一<sup>[7]</sup>。其中,建筑运行相关的二氧化碳排放分为直接排放和间接排放<sup>[8]</sup>。根据中国建筑节能协会发布的《中国建筑能耗研究报告(2020)》,2018年全国建筑全过程能耗总量为21.47亿tce,占全国能源消费总量比重为46.5%。其中,建材生产阶段、施工阶段、运行阶段能耗占全国能耗的比例分别为23.8%、1.0%、21.7%。另外,2018年,我国建筑全过程碳排放总量49.3亿吨,占全国碳排放的比例为51.3%,其中,建材生产阶段、施工阶段、运行阶段碳排放占全国碳排放的比例分别为28.3%、1.0%和22.0%。

碳中和是指碳排放总量要等于或小于碳汇所吸附的总量。清华大学江亿<sup>[8]</sup>等人指出建筑领域应该把零排放作为实现碳中和的基本目标,并给出取消直接碳排放、协助减少电力和热力使用导致的间接碳排放、减少建造和维修用材的生产和运输导致

的碳排放、以及避免建筑空调制冷系统使用中非二氧化碳类温室气体的排放实现我国建筑领域碳中和的四个主要任务,这一技术路径在业内形成一致共识。然而,建筑的可持续发展需要量化的依据和支持,梳理建筑领域碳中和实现路径面临的建筑全生命周期温室气体排放量的精准计量、建筑建材及设备节能检测、清洁能源发电及并网领域计量测试技术等一系列计量问题,积极推进加快相应计量技术研究及应用,是我国建筑领域碳达峰和碳中和战略制定迫切需要的基础研究工作之一,对我国碳达峰与碳中和战略的实现具有重要意义。

## 1 碳排放量核算

### 1.1 燃料端核算法

建筑的碳排放核算范围包括建筑生命周期全过程,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的计算模型<sup>[9]</sup>规定燃料端核算法是以活动水平和排放因子来估算建筑的碳排放量。GB/T 51366《建筑碳排放计算标准》<sup>[10]</sup>和CECS 374《建筑碳排放计量标准》<sup>[11]</sup>也分别给出了建筑不同阶段碳排放的计算边界、排放因子选取和碳排放计算方法,但在具体表述上略有不同,两部现行有效标准主要内容比较如表1所示。

表1 GB/T 51366和CECS 374主要内容比较

Table 1 Comparison of main contents of GB/T 51366 and CECS 374

内容标准	GB/T 51366	CECS 374
计算边界	与建筑物建材生产及运输、建造及拆除、运行等活动相关的温室气体排放的计算范围	建筑从建材生产至最终拆解、回收的一系列前后衔接的各阶段内温室气体排放的计算范围
阶段划分	材料生产及运输阶段、运行阶段、建造及拆除阶段	材料生产阶段、施工建造阶段、运行维护阶段、拆解阶段、回收阶段
排放因子	在附录中列出了主要能源碳排放因子、建材碳排放因子、建材运输碳排放因子等。其中,化石燃料单位热值CO <sub>2</sub> 排放因子依据《省级温室气体清单编制指南(试行)》中相关数据计算获得,其他能源有效CO <sub>2</sub> 排放因子来源于《IPCC国家温室气体清单指南(2006)》,建材碳排放因子来源于中国生命周期基础数据库(CLCD)	在附录中给出了常用能源的碳排放因子。其中,化石燃料碳排放因子来源于《IPCC国家温室气体清单指南(2006)》,电力碳排放因子来源于《省级温室气体清单编制指南(试行)》
计算方法	对设计图纸、施工方案等技术材料中与碳排放有关的数据进行统计、计算和汇总,使用标准给出的方法和因子,计算得到建筑碳排放量	清单统计法、信息模型法

以 GB/T 51366《建筑碳排放计算标准》<sup>[10]</sup>规定的建筑物碳排放量计算方法为例,建筑生命周期单位建筑面积的总碳排放量为:

$$C_{total} = C_{cons} + C_{use} + C_{break} + C_{material}$$

其中:

建筑建造阶段单位建筑面积的碳排放量:

$$C_{cons} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{jz,i} EF_i}{A}$$

式中,  $E_{jz,i}$  为建筑建造阶段第  $i$  类能源总用量, kWh 或 kg;  $EF_i$  为第  $i$  类能源的碳排放因子, kgCO<sub>2</sub>/kWh 或 kgCO<sub>2</sub>/kg;  $A$  为建筑面积, m<sup>2</sup>。

建筑运营阶段单位建筑面积的碳排放量:

$$C_{use} = \frac{[\sum_{i=1}^n (E_i EF_i) - C_p] y}{A}$$

式中,  $E_i$  为建筑运营阶段第  $i$  类能源年消耗量, 单位/a;  $C_p$  为建筑绿地碳汇系统年减碳量, kgCO<sub>2</sub>;  $y$  为建筑设计寿命, a。

建筑拆除阶段单位建筑面积的碳排放量:

$$C_{break} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{cc,i} EF_i}{A}$$

式中,  $E_{cc,i}$  为建筑拆除阶段第  $i$  类能源年消耗量, kWh 或 kg。

建材生产及运输阶段单位建筑面积的碳排放量:

$$C_{material} = \frac{C_{sc} + C_{ys}}{A}$$

式中,  $C_{sc}$  为建材生产阶段碳排放, kgCO<sub>2</sub>e;  $C_{ys}$  为建材运输过程碳排放, kgCO<sub>2</sub>e。

由此可见,排放因子的取值直接决定了建筑碳排放的精准计量。然而,当前国内外针对碳排放核算的研究多集中于国家或区域层面,所提供的排放因子也是适用于国家或区域层面的排放因子。

《IPCC 国家温室气体清单指南(2006)》和《省级温室气体清单编制指南(试行)》提供的温室气体排放因子数据库是使用最广泛的排放因子库,GB/T 51366《建筑碳排放计算标准》和 CECS 374《建筑碳排放计量标准》均对其进行了引用,但这两部标准针对同一能源,因数据来源不同给出的碳排放因子也存在着差异。针对某一个具体的建筑,

如果选用不同排放因子库的排放因子缺省值进行计算将会产生不同的结果,相对碳排放量真值也会产生较大的误差,不利于碳排放量的准确核算。因此,针对建筑的建造、运营和拆除,结合准确的测量技术建立行业排放因子库,研究确定更准确可靠的建筑领域燃料端碳排放核算方法是当前建筑领域实现由宏观“碳核算”到精准“碳计量”转变的基础研究工作之一。

## 1.2 排放端核算法

目前,由于缺乏高精度的碳排放监测和计量手段,很难客观精准地反应某一建筑物尺度排放源的分布排放特征,传统的碳排放量的研究一般采用燃料端核算的单向研究手段。通过大气环境监测,结合大气传输模型、贝叶斯、卡尔曼滤波等反演算法提供了一个独立于统计核算的科学碳排放评估方法,然而,目前国内外此类研究主要应用于对全球和城市尺度碳源/汇的空间分布及强度估计<sup>[12,13]</sup>。针对园区、建筑等小区域尺度,如何融合高精度高密度数据监测网络,建立高时空分辨排放量监测评估系统是亟待解决的前沿问题。对此,任歌<sup>[14]</sup>等人取得了很好的研究进展,使用自主研发的高精度监测仪器获得准确的浓度、气象监测信息,结合气象场模式分析、粒子扩散和反演算法,构建了小区域尺度碳排放溯源体系,并在郑州开展应用示范,实现了无组织排放源的定位/定量分析和“燃料端到排放端”碳数据的互验核查。初步建立了企业、工业园区等小区域尺度的碳排放监测、评估和核查系统,得到网格分辨率为 100m×100m、时间分辨率为 1 小时温室气体排放信息,可基本实现对碳核查数据的有效核验,为管理部门实现碳排放的精准治理提供了技术支撑。

如何应用上述技术,针对建筑行业施工、拆除等典型碳排场景,建立高精度的碳排放监测、反演、核查体系,获得不依赖排放清单初值的反演结果,仍是下一步需要研究的重点。

## 2 建筑节能检测

取消直接碳排放作为建筑运行阶段实现零碳的主要途径,必须要实现炊事、生活热水的“电气化”,这不仅会带来烹调文化的变化,更会由于化石能源的使用减少带来用电负荷的急剧增加。针对全国目前的 7.5 万亿 kWh 的用电总量,充分开发

利用核电、水电、抽水蓄能电站, 以及风电、光电和生物质能电站, 基本可以实现电力系统零碳。但由于核电、水电和生物质燃料的火电都已经达到其发展上限, 如果在此基础上进一步增加总的电量需求, 增加部分就只能通过风电、光电来满足, 而进一步发展风电、光电面临诸多困难。因此节能将是实现碳中和最重要的前提条件<sup>[8]</sup>。

建筑节能是指在建筑物的规划、设计、建造、改造和使用过程中, 采用节能型的技术、工艺、设备、材料和产品, 提高保温隔热性能和采暖供热、空调制冷制热系统效率, 加强建筑物用能系统的运行管理, 在保证室内热环境质量的前提下, 减少供热、空调制冷制热、照明、热水供应的能耗。新型

建筑材料是建筑节能工程的重要物质基础和关键环节, 调整建材生产耗能结构, 推进建筑材料创新, 大力发展环保型墙材、工业废渣混凝土、高性能混凝土技术、建筑垃圾回收利用、固碳材料是建材生产阶段碳中和的主要途径。

从检测内容来看, 按国家和地方现行建筑节能工程竣工验收规范和相关技术标准, 建筑节能工程检测主要是对建筑围护结构各部件(建筑外窗、户门、楼面或屋面、建筑外墙和分户墙等)、组成各部件的保温隔热系统和系统各组成材料的检测以及采暖空调设备运行效果节能性的检测。大致可以分为三个检测类型<sup>[15]</sup>: 材料设备复验、现场拉拔试验、现场实体检测。目前常见检测项目见表 2~表 4。

表 2 材料设备复验的检测项目

Table 2 Inspection items for re inspection of materials and equipment

工程	检测项目
墙体节能	保温材料的导热系数、密度、抗压强度或压缩强度、尺寸稳定性、压剪粘结强度
	增强网的力学性能、抗腐蚀性
	粘结材料(包括抗裂砂浆)的粘结强度
屋面节能	“双组分”保温浆料(胶粉聚苯颗粒)同条件养护试块的导热系数、干密度、抗压强度、线性收缩率
地面节能	保温材料的导热系数、密度、抗压强度或压缩强度
幕墙节能	保温材料的导热系数、密度、抗压强度或压缩强度
	保温材料: 导热系数、密度
	幕墙玻璃: 传热系数、中空玻璃露点、玻璃遮阳系数、可见光透射比
	隔热型材: 抗拉强度、抗剪强度
	气密性

表 3 现场拉拔试验的检测项目

Table 3 Inspection items of on-site pull-out test

工程	检测项目
墙体节能	保温板材与基层的粘结强度(抗拔试验)
	固定墙体保温层的后置锚固件的锚固为抗拔试验
	薄抹面层的抹面层与保温层粘结强度现场拉拔试验
	外墙外保温饰面砖的粘结强度

表 4 现场实体检测的检测项目

Table 4 Inspection items of on-site entity inspection

工程	检测项目
维护结构节能	外墙节能构造—保温材料种类、保温层厚度及构造做法
	外窗气密性

调研发现, 完成以上检测项目, 仍存在大多数检测设备依赖进口, 一些新型建筑材料和工艺做法

因缺乏统一的检测方法导致检测数据一致性较差等一系列问题。因此, 面对新型建筑材料和电气化

设备的出现,节能检测还需要在检测设备研制、检测方法和检测结果的一致性保证等方面开展研究,以更好的服务于建筑节能工作,为建筑实现零碳路径做好技术支撑。

### 3 新能源利用计量技术

为实现碳中和的目标,建筑电气化用电最好都来自于零碳电力。零碳电力主要包括水电、核电、风电、光电等,其中,受各种自然环境条件的约束,水电和核电具有发展上限,风电及光电具有可长久持续发展的特点,可以很好地满足建筑应用,所以风电和光电是建筑用零碳电力的较好选择。近年来,随着光伏发电装置的广泛应用,在建筑当中实现“光伏发电、储能蓄电、直流供电、柔性用电”成为可能<sup>[16]</sup>。

“光储直柔”的基本原理如图 1 所示,在“光储直柔”新型能源系统中,“光”是充分利用建筑表面发展分布式光伏发电;“储”就是蓄电池,包括电动汽车内的蓄电池和建筑内部的蓄电池,为建筑形成比较大的蓄电能力,来解决移峰调节问题;“直”是指建筑内部的直流配电系统,通过对直流电压的控制,调节建筑内部用电设备的用电功率,从而实现“柔”;“柔”是柔性用电,使建筑用电成为弹性负载,电网取电曲线和建筑用电曲线解耦,让建筑用电不再是刚性负载。建筑取电量随外网风电光电情况变化,建筑用电负荷和外网发电量的差值依靠建筑内及电动汽车蓄电装置和直流负载调节维持建筑的运行,即做到需求侧响应,从而具备与城市电网互动的能力,并有效消纳外来的风电光电<sup>[17]</sup>。

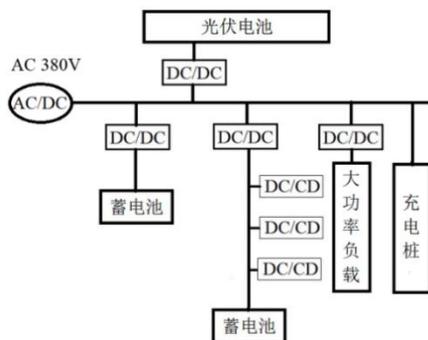


图 1 “光储直柔”建筑配电系统

Fig.1 "PEDF" building power distribution system

由于光伏发电存在输出功率随光照强弱波动及白天发电与夜间停机两种状态等缺点,协调用户端并网总功率平滑、稳定,减少对电网的扰动成为了智能电网用户端面临的新问题。随着分布式电源和可控负荷接入用户侧微电网,微电网的计量和监控都将受到一定的影响。在分布式电源和储能设备的接口处,电力电子变换器将大量的谐波电压和谐波电流引入微电网,进而带来电压波动、电压闪变、谐波含量等电能质量问题。因此,考虑多种电能质量问题对电能计量精度的影响和矫正方法就尤为重要。以谐波污染为例,考虑全波电表情况下,电网谐波使得谐波源用户的电能计量减少而非谐波源用户的电能计量增加<sup>[18]</sup>。为了应对分布式电源接入条件下的用户侧微电网计量与监控要求,具备正向有功电能和反向有功电能的高精度计量、电能质量监控和对分布式电源及可控负荷的监控功能的双向计量与监控一体化终端就显得十分重要。

此外,电动汽车充电桩作为建筑“光储直柔”技术推广应用的重要基础设施,同时也是电动汽车充电最基础的电力设施。其中,电动汽车充电所用的直流充电桩含有大功率非线性直流充电机,在充放电的过程中会产生谐波,虽经过必要的消谐装置处理,但仍会有残余谐波污染电网,同时可能产生错计电量的状况,所以有必要对充电桩充电负荷对电网影响进行研究<sup>[19]</sup>。另外,电动汽车是脉动式充电,充电过程存在大量的纹波,对计量表计也会产生影响,需要选择特定的表计进行测量。目前对电动汽车充电桩能效测试尚不能直接完整地进行,内部电能计量的表计也无法直接溯源<sup>[20-22]</sup>。

### 4 结语

建筑是能源消费的三大领域(工业、交通、建筑)之一,也是造成直接和间接碳排放的主要责任领域之一。在 2030 年之前力争实现碳达峰,2060 年实现碳中和,这是中央对我国低碳发展给出的明确目标和时间表。本文通过分析给出了建筑领域实现碳中和路径中尚需解决的一系列计量问题。

(1) 针对建筑全生命周期碳排放量核算,积极发展精密测量技术,研究确定更准确可靠的建筑领域碳排放因子,并获得不依赖排放清单初值的行业典型碳排放场景反演结果,是当前建筑领域实现

由宏观“碳核算”到精准“碳计量”转变的重要研究工作。

(2) 建筑节能作为实现建筑领域碳中和的核心内容,面对新型建筑材料和电气化设备的出现,节能检测还需要在检测设备研制、检测方法和检测结果的一致性保证等方面开展研究。

(3) 光电作为解决建筑领域零碳电力的主要方式,协调用户端并网对计量和监控系统的影响依然是目前急需解决的新计量问题。

由此可见,建筑领域碳中和带来了诸多计量挑战。限于篇幅,本文仅对部分技术问题进行了梳理,面对“3060”双碳目标,计量应充分发挥引领作用,形成超前技术储备,助推建筑领域碳中和目标的顺利实现。

#### 参考文献:

- [1] World meteorological organization. State of the global climate 2020. (WMO-No.1264)[EB/OL].[2021-08-01].
- [2] MIHIRETUA, OKOYOEN, LEMMAT. Causes, indicators and impacts of climate change:understanding the public discourse in goat based agro-pastoral livelihood zone. Ethiopia[J]. Heliyon, 2021,7(3):e06529.
- [3] JAKUĆIONYTĖ-SKODIENĖ M, LIOBIKIENĖ G. Climate change concern. personal responsibility and actions related to climate change mitigation in EU countries:cross-cultural analysis[J]. Journal of cleaner production, 2021,281:125189.
- [4] GULCEBI M I, BARTOLINI E, LEE O, et al. Climate change and epilepsy: insights form clinical and basic science studies[J]. Epilepsy and behavior, 2021,116: 107791.
- [5] POKHREL S R, HEWAGE K, CHHIPI-SHRESTHA G, et al. Carbon capturing for emissions reduction at building level: a market assessment from a building management perspective[J]. Journal of cleaner production, 2021,294:126323.
- [6] 邓旭,谢俊,滕飞.何谓“碳中和”?[J].气候变化研究进展,2021,17(1):107-113.
- [7] Zhang C,Su B, Zhou K,et al. Decomposition analysis of China's CO<sub>2</sub> emissions(2000-2016)and scenario analysis of its carbon intensity targets in 2020 and 2030[J]. Science of The Total Environment, 2019,668:432-442.
- [8] 江亿,胡珊.中国建筑部门实现碳中和的路径[J].暖通空调,2021,51(5):1-13.
- [9] 彭卓,郭春梅,汪磊磊,等.绿色建筑全生命周期CO<sub>2</sub>排放敏感性与减碳潜力研究[J].天津城建大学学报,2021, 27(6):436-441.
- [10] GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [11] CECS 347:2014,建筑碳排放计量标准[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [12] 蔡博峰.城市温室气体清单研究[J].气候变化研究进展,2011,7(1):23-28.
- [13] ZHAO Y, NIELSEN C P, LEI Y, et al. Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China[J]. Atmos Chem Phys, 2011,11(5):2295-2308.
- [14] 任歌,张亮,林鸿,等.温室气体和大气污染物排放量监测与计量研究[J].计量技术,2020,(5):79-84.
- [15] 白英杰.建筑节能检测浅析[J].建筑经济,2010,(11):20-21.
- [16] 范丽佳.中国建筑业碳排放现状及“光储直柔”碳中和路径[J].重庆建筑,2021,(10):21-23.
- [17] 徐倩,笪颖,张钰敏,等.“光储直柔”助推中国绿色能源革命[N].新华日报,2021-08-24(013).
- [18] 罗亚桥,胡狮.谐波对电能计量的影响分析[J].电力自动化设备,2009,(5):130-132.
- [19] 刘建,徐晴,孙应军,等.用于电动汽车直流充电桩的能效计量方案研究[J].电测与仪表,2017,54(23):328-332.
- [20] 陈新琪,李鹏,胡文堂,等.电动汽车充电站对电网谐波的影响分析[J].中国电力,2008,41(9):31-36.
- [21] Sustanto D, Fok C C. Harmonic load flow study fur electric vehicle chargers[J]. Power Electronics and Drive Systems, 1999,1:495-500.
- [22] 李志刚,梅霜,王少杰,等.IGBT 模块开关损耗计算方法综述[J].电子技术应用,2016,42(1):10-15.