

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.09.003

# 信息物理融合下的建筑施工现场碳排放实时监测系统

刘贵文, 杨浩, 傅晏, 毛超, 徐鹏鹏, 洪竞科, 李凯健

(重庆大学 a. 建设管理与房地产学院; b. 城乡建设与发展研究院, 重庆 400045)

**摘要:** 随着全球变暖现象加剧, 控制建筑业碳排放成为了重要研究课题, 建筑施工现场碳排放的计算与监测问题成为重点。为了有效解决这一问题, 梳理了现有碳排放计算方法, 总结了各类方法的特点, 提出了基于信息物理系统(CPS)技术的施工现场碳排放实时监测系统框架; 针对施工现场碳排放计算边界及计算逻辑进行了定义, 并从硬件系统与软件系统两部分实现了碳排放实时监测系统的开发。最后, 通过无线传感器、服务器、数据库以及客户端的有效耦合, 实现了对建筑施工现场的碳排放进行实时监测和数据分析。

**关键词:** 施工现场; 碳排放; 实时; 信息物理系统

**中图分类号:** TU71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2020)09-024-08

## Real-time monitoring system of carbon emission in construction site under the cyber-physical systems

LIU Guiwen, YANG Hao, FU Yan, MAO Chao, XU Pengpeng, HONG Jingke, LI Kaijian

(a. School of Construction Management and Real Estate; b. Institute of Urban-Rural Construction and Development, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The control of carbon emission in construction industry becomes an important research topic with the aggravation of global warming, hence the need for research of calculation and monitoring of carbon emission in construction sites. In this paper, the existing carbon emission calculation methods were combed out, and the characteristics of them were summarized. Then, the framework of real-time monitoring system of carbon emission in construction sites combined with cyber-physical systems (CPS) technology was proposed. The calculation boundary and calculation logic of carbon emission were defined, and the real-time carbon emission monitoring system was developed from hardware system and software system. Through the effective coupling of wireless sensors, servers, databases and clients, the system finally accomplished real-time monitoring and data analysis of carbon emissions in construction sites.

**Keywords:** construction site; carbon emission; real-time; cyber-physical systems

**收稿日期:** 2019-12-09

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费资助项目(2019CDJSK03PT07); “十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701807); 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目资助项目(KJQN201800125)。

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2019CDJSK03PT07), “13th Five Year” National Key R&D Program of China(2016YFC0701807), and the Youth Project of Science and Technology Research Program of Chongqing Education Commission of China(KJQN201800125).

**作者简介:** 刘贵文(1974—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑工业化方向研究, (E-mail) gwliu@cqu.edu.cn。

随着世界经济的发展,化石能源的消耗使得全球变暖现象变得越来越严重。根据政府间气候变化专门委员会第五次评估报告显示,1880年—2012年,全球海洋与陆地表面平均温度上升了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,呈现出越来越严重的趋势<sup>[1]</sup>。与此同时,作为全球气候变暖的主要原因,碳排放引起了全世界的广泛关注,尤其是二氧化碳碳排放<sup>[2-3]</sup>。因此,控制碳排放已经成为了人类面临的重大课题。

作为能源密集型产业,建筑业及相关产业是能源消耗大户,造成了大量碳排放,成为节能减排的重点行业<sup>[4]</sup>。研究表明,到2030年,建筑业产生的碳排放量将占全社会排放总量的25%<sup>[5]</sup>。为了寻求降低建筑业碳排放的途径,许多学者针对建筑业碳排放计算及评价进行了研究,由此产生了一系列成果。但是,目前的碳排放计算方法存在不完善之处,如生命周期法经常面临数据收集困难及边界定义模糊等问题<sup>[6]</sup>;另一方面,施工现场阶段的碳排放具有集中性与突发性<sup>[5]</sup>,目前,我国针对施工现场碳排放的研究仍较少。因此,文中引入信息物理融合系统(CPS)技术建立建筑施工现场碳排放实时监测及可视化系统,丰富了施工现场碳排放的研究成果,有助于加深人们对施工现场碳排放变化规律的认识,通过相应的管理措施实现节能减排;同时,实时监测系统还能形成施工现场的信息平台,并与智慧工地进行相应的结合。

## 1 碳排放计算方法概述

建筑领域应用最广泛的碳排放计算方法是生命周期法(LCA, life cycle assessment),该方法从产品的整个生命周期评估其对环境的影响,已广泛运用于工程、材料、设备等领域<sup>[7]</sup>。以此为基础,许多智能方法应运而生,在碳排放研究领域取得了较好的效果<sup>[8]</sup>。

根据系统边界和适用范围等原则,LCA可分为基于过程的生命周期法(PLCA, Process-based LCA)、投入产出分析法(I-O LCA, input-output LCA)以及混合分析法(HA, hybrid analysis)。其中,PLCA是微观层面的自下而上的计算方法,需要详细的过程数据来计算碳排放,通过定义每个建筑活动过程所需的能源及材料消耗来计算每个过程的环境影响<sup>[9]</sup>。I-O LCA是自上而下的计算方法,基于投入等于产出的原则,总结出每个建筑活动过程涉及的相关经济部门的单位货币碳排放强度,并将施工过程中的材料等消耗转化为货币形式,进而计算出碳排放<sup>[10]</sup>。而HA方法结合了PLCA的计算过程可靠性与I-O LCA的研究边界完整性,为碳排放计算提供了更可靠的手段<sup>[11]</sup>。虽然生命周期法在碳排放计算领域取得了重要成果,但该方法也有不完善之处。生命周期法的优缺点如表1所示。

近年来,随着信息技术的发展,产生了一系列基于生命周期法的智能方法,国外针对该领域的研究较多。例如,将CAD与地理信息系统相结合实现建筑活动温室气体和其他有害气体排放的可视化<sup>[12]</sup>;利用离散事件仿真平台对现场施工过程产生的 $\text{CO}_2$ 进行模拟,从中寻找降低 $\text{CO}_2$ 排放的途径<sup>[13]</sup>;利用历史环境绩效指标数据与员工访谈意见相结合的线性回归模型对建筑业碳排放进行计算与评估<sup>[14]</sup>。

以上方法改变了传统生命周期法的数据收集与处理方式,一定程度上提高了数据处理效率及数据可视化程度,丰富了碳排放管理实践。然而,这些方法大都着重于对碳排放进行模拟和预测,较少考虑施工阶段碳排放的实时监测;包括传统生命周期法在内,现有方法大多使用工程定额或工程量清单进行碳排放计算,这些资料对于单个建筑项目的针对性不够强,容易出现与实际不相符的情况。文中从施工阶段碳排放实时监测的角度出发,探索碳排放计算的新方法。

表1 生命周期法优缺点总结

Table 1 Summary of advantages and disadvantages of the life cycle assessment method

评价方法	优点	缺点
PLCA	计算精度较高	数据收集费时费力;容易出现系统边界截断误差
I-O LCA	能提供更完整的系统边界	计算精度较低;适用性较低
HA	结合PLCA与I-O LCA的优点	面临缺乏相关统计数据的问题

## 2 CPS 系统框架研究

一般来说,CPS 可以分为物理层、计算层及交互层<sup>[15]</sup>。物理层由各类传感设备构成,是系统获取物理世界信息的重要渠道;计算层由相应的服务器以及数据库等部分构成,主要负责数据的计算、存储以及处理;交互层由便携式客户端及可视化模型构成,主要实现物理世界与信息世界的交互。

结合文中研究,CPS 碳排放实时监测与可视化系统框架如图 1 所示。其中,物理层主要由无线传感器组成,用于收集施工现场数据信息,并通过 GPRS 模块将数据实时传输至计算层。计算层主要包括服务器及数据库,其中,服务器的主要功能为计算碳排放,而数据库的主要功能为存储碳排放数据及其他计算所需相关数据。交互层主要由桌面端、手机端与 Web 端组成,主要便于用户进行信息录入、碳排放数据查看以及可视化模型访问。为了方便系统开发,文中将物理层纳入硬件系统部分,而计算层、交互层等纳入软件系统部分。

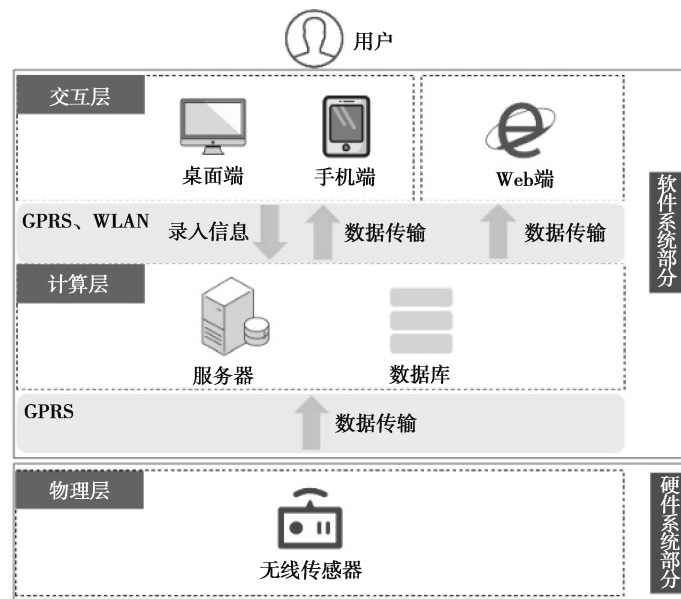


图 1 基于 CPS 的施工现场碳排放实时监测与可视化系统框架

Fig. 1 System framework of real-time monitoring and visualization of construction site based on CPS

## 3 碳排放计算边界及计算逻辑

### 3.1 计算边界定义

为了实现系统开发,对施工现场碳排放的定量计算进行研究,明确需要从施工现场收集的数据类型,对施工现场碳排放计算边界进行定义。

据文献报道,在施工现场,由于各类施工机械消耗燃油及电能而产生的碳排放占到了施工阶段总碳排放的绝大部分<sup>[16]</sup>。其中,施工机械消耗电能产生的碳排放占总碳排放中所占比例最高,最具有节能减排潜力<sup>[17]</sup>。因此,文中的碳排放计算边界为各类施工机械在运行过程中产生的碳排放。

在系统开发过程中,文中选择了塔式起重机、施工电梯及转运车进行研究。具体原因如下:作为决定现场施工进度的重要大型机械,塔式起重机在运行过程中需要消耗大量电能,是施工现场碳排放占比较高的机械设备之一;施工电梯承担着除塔式起重机之外的绝大部分现场垂直运输工作,其使用具有零散性,有独特的研究意义;而现场转运车的使用几乎贯穿整个建造阶段,针对转运车的研究可以借鉴到诸如推土机、挖掘机等机械的研究中。

### 3.2 计算逻辑建立

部分学者采用直接测量法,利用传感器直接测量施工机械的耗电量,将其进行汇总得到所有机械的耗电量<sup>[18]</sup>。虽然这种方法计量准确,统计便利,但忽略了施工现场燃油消耗产生的碳排放。因此,采取间接测量的方法,通过统计各类机械运行时间来获取施工机械的能源消耗,然后转化为碳排放。

### 3.2.1 定量计算公式

开发的基于 CPS 的碳排放实时监测与可视化系统,一共监测三类施工机械的碳排放

$$C_0 = C_1 + C_2 + C_3, \quad (1)$$

其中, $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 分别代表系统监测的总碳排放、塔式起重机产生的碳排放、施工电梯产生的碳排放以及现场转运车产生的碳排放( $\text{kgCO}_2$ )。

再分别建立塔式起重机、施工电梯及现场转运车等三类机械的碳排放定量计算公式。

#### 1) 塔式起重机

塔式起重机属于耗电型机械,不同型号的起重机往往有着不同的额定功率,利用无线传感器统计其运行时间,再结合额定功率与电力碳排放因子,便可完成碳排放的计算,计算过程如式(2)所示

$$C_1 = \sum_{i=1}^m P_{1,i} * \left( \frac{T_{1,i}}{3\ 600} \right) * f_e, \quad (2)$$

式中: $m$ 为施工现场塔式起重机数量,台; $P_{1,i}$ 为第*i*台塔式起重机额定功率,kW; $T_{1,i}$ 为第*i*台塔式起重机运行时间,s; $f_e$ 为电力碳排放因子, $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ ; $m$ 及 $P_{1,i}$ 均可从工程资料中获取, $T_{1,i}$ 由 CPS 碳排放监测系统从施工现场获取, $f_e$ 可通过整理获得。

#### 3.2.2 施工电梯

与塔式起重机类似,施工电梯碳排放计算过程如式(3)所示

$$C_2 = \sum_{i=1}^n P_{2,i} * \left( \frac{T_{2,i}}{3\ 600} \right) * f_e, \quad (3)$$

式中: $n$ 为施工现场施工电梯的数量,台; $P_{2,i}$ 为第*i*台施工电梯的额定功率,kW; $T_{2,i}$ 为第*i*台施工电梯的运行时间,s; $n$ 及 $P_{2,i}$ 可从工程资料中获取, $T_{2,i}$ 由 CPS 碳排放监测系统从施工现场获取。

#### 3.2.3 现场转运车

现场转运车属于耗油型机械,其碳排放计算与前者略有不同。转运车每单位工作台班  $T_0$  有对应的燃油消耗量,其碳排放计算式为

$$C_3 = \sum_{i=1}^k \left( \frac{T_{3,i}}{T_0 * 3\ 600} \right) * E_{3,i} * f_i, \quad (4)$$

式中: $k$ 为施工现场转运车的数量,辆; $T_{3,i}$ 为第*i*辆现场转运车的工作时间,s; $E_{3,i}$ 为第*i*台现场转运车的单位台班燃油消耗, $\text{kg}/T_0$ ; $f_i$ 为燃油碳排放因子, $\text{kgCO}_2/\text{kg}$ ; $T_0$ 为台班,时长为 8 h。

同样地,除 $T_{3,i}$ 外,其余参数的值均可从相关资料中获取。此外,转运车的燃油消耗可能为汽油或者柴油,当消耗汽油时,应选择汽油碳排放因子进行计算;当消耗柴油时,应选择柴油碳排放因子进行计算。而相应的转运车台班燃油消耗量 $E_{3,i}$ 可以从相应定额中查找<sup>[17]</sup>。

#### 3.2.4 碳排放因子

由碳排放定量计算公式可知,碳排放因子是碳排放计算过程中的重要参数,直接影响着计算结果的准确性与合理性。因此,需要对碳排放因子进行整理。

各类能源在消耗过程中产生的温室气体不仅包括  $\text{CO}_2$ , 还包括  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{HFC}$ 、 $\text{PFC}$ 、 $\text{SF}_6$  等气体,这些气体的产生量远远低于  $\text{CO}_2$ , 总体上  $\text{CO}_2$  对气候变暖的影响最大。其余温室气体对全球变暖的影响均可通过相应的全球变暖潜能值(GWP)转换为  $\text{CO}_2$  当量值进行衡量,记为  $\text{CO}_{2e}$ , 以便统一度量所有温室气体带来的温室效应<sup>[17]</sup>。

《2015年中国区域电网基准线排放因子》文件中公布了我国各地区电力碳排放因子值,其中,重庆地区电力碳排放因子建议取值为 $f_e = 0.951\ 5\ \text{kg}\ \text{CO}_{2e}/\text{kWh}$ <sup>[19]</sup>。此外,汽油与柴油的当量碳排放因子如表3所示。

表3 燃油类碳排放因子<sup>[17]</sup>

Table 3 The carbon emission factors of fuel

能源种类	$f_i/(\text{kg}\ \text{CO}_{2e}/\text{kg})$
汽油	3.51
柴油	3.68

## 4 碳排放实时监测系统开发

### 4.1 硬件系统开发

由图 2 可知,硬件系统主要包括无线传感器,负责统计施工现场机械的运行时间,并实时发送至服务器。针对 3 类不同的施工机械,选用了 3 类传感器,分别为:加速度传感器、气压传感器及 GPS 传感器。其中,加速度传感器通过感知吊钩的移动监测塔式起重机的运行,气压传感器通过感知周围气压的变化监测施工电梯的运行,而 GPS 传感器通过感知位置变化监测转运车的运行。此外,传感器与施工机械之间形成一一对应关系,以便对每台机械的运行时间进行统计。

笔者针对传感器设计了集成盒,并利用 3D 打印技术制成成品。以加速度传感器为例,如图 2 所示,

集成盒外部有控制按钮及显示屏,以使用户设置传感器初始状态并查看其工作状态。集成盒内部由多个模块组合而成,包括加速度传感器模块、单片机模块、主板电路模块、GPRS 模块、电源模块以及蜂鸣器模块等。集成盒的设计,不仅使得无线传感器的功能更加完善,还有利于传感器在施工现场机械上的安装与固定,同时还能保护传感器模块,一定程度上隔离施工现场相关环境干扰。

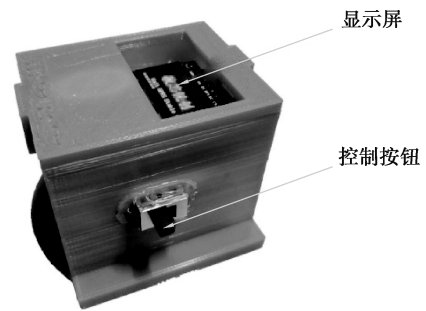


图 2 传感器集成盒  
Fig. 2 Sensor integration box

### 4.2 软件系统开发

#### 4.2.1 计算层开发

##### 1) 服务器开发

系统服务器的主要功能包括:1)记录施工机械运行时间;2)计算施工机械实时碳排放;3)传输碳排放数据。采用 Apache 服务器,它具有高度的跨平台和安全特性,可以实时接收多类数据。当无线传感器获取机械运行状态后,该信息将实时传送到服务器,以便统计每台机械的运行时间。

##### 2) 数据库开发

数据库的功能为相关数据的储存,主要包括:①施工现场机械型号、编号及与之对应的传感器编号;②施工机械的功率或能耗;③施工机械运行时间;④碳排放因子;⑤碳排放数据。文中采用 MySQL 数据库,它是一种开源的关系数据库管理系统,拥有较好的速度、可靠性和适应性,以表格形式对系统中的每一组数据进行存储。用户可以通过计算机对数据进行导入、修改、搜索等一系列操作。

#### 4.2.2 交互层开发

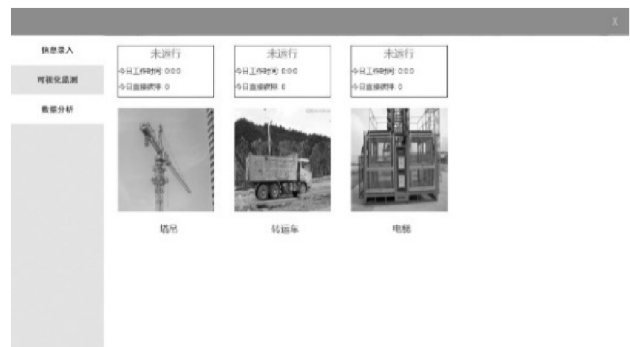
交互层主要包括桌面端、手机端及 Web 端,是用户与系统交互的渠道,主要方便用户进行信息录入、碳排放数据查看及可视化模型访问。

##### 1) 桌面端开发

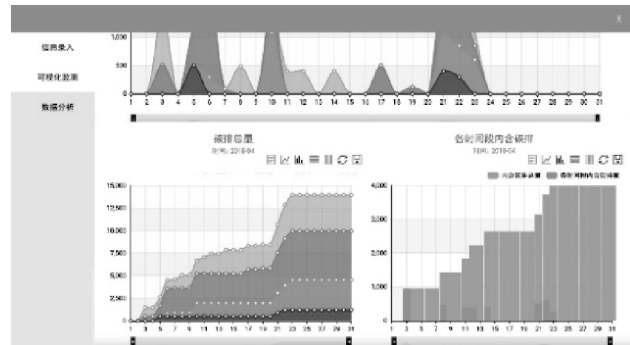
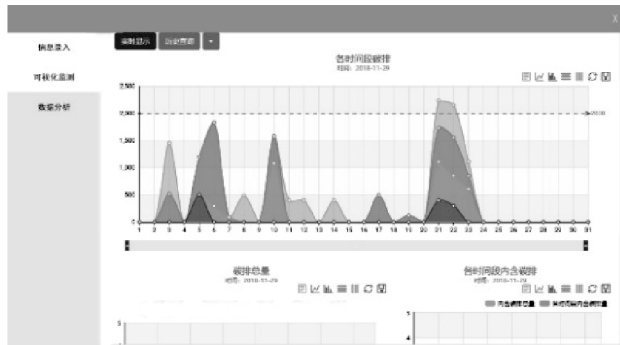
桌面端主界面共包括 3 个基本界面,分别为信息录入界面、可视化监测界面及数据分析界面。如图 3 所示,在信息录入界面,用户可手动录入或自动导入施工机械的类别、型号、编号、单位能耗或功率以及与之对应的传感器编号。在可视化监控界面,用户可访问可视化模型,该模型展示出每台施工机械的运行状态、累计运行时间及碳排放产生量,同时,还能提供碳排放超标预警功能。在数据分析界面,桌面端提供了丰富的碳排放数据分析形式,利用各种二维图表(曲线图、直方图等)对施工现场实时碳排放、累计碳排放进行展示,通过该界面,用户能详细了解施工现场碳排放的分析结果。此外,桌面端还提供历史数据查询功能,方便用户对历史数据进行查询。



信息录入界面



可视化监测界面



数据分析界面

图 3 桌面端功能界面图

Fig. 3 Functional interface diagram of the desktop side

### 2) 手机端开发

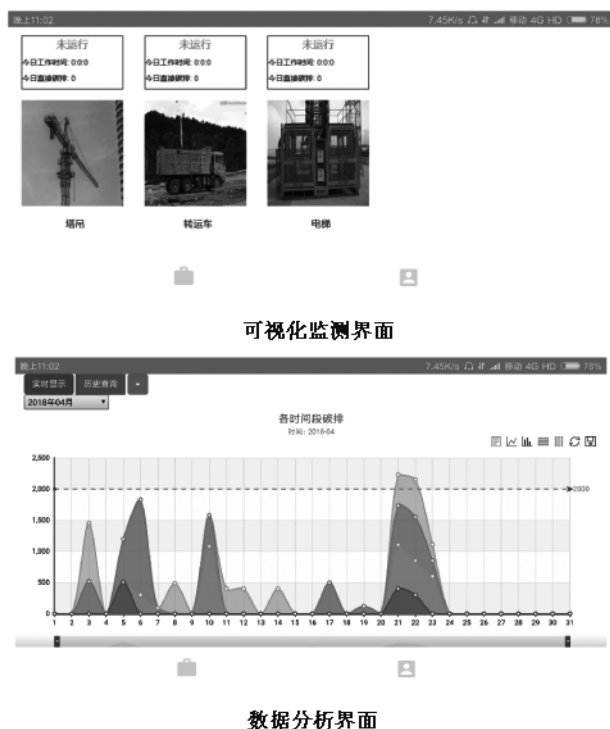
手机端功能与桌面端大致相同,不同之处在于:一是进入手机端主界面前,用户需输入特定的帐号与密码进行登录;二是手机端主界面中第一个界面不是信息录入界面,而是现场设备查看界面,通过该界面,用户能对施工现场机械进行查看与核对。除此以外,手机端其余功能界面均与桌面端相同,如图 4 所示。



登录界面



主界面



可视化监测界面

数据分析界面

图 4 手机端功能界面图

Fig. 4 Function interface diagram of the mobile terminal

### 3) Web 端开发

除了桌面端与手机端,系统还提供 Web 端访问形式,便于用户以访客形式对施工现场机械可视化模型及碳排放数据分析结果进行访问,其展示效果与桌面端、手机端一致,如图 5 所示。

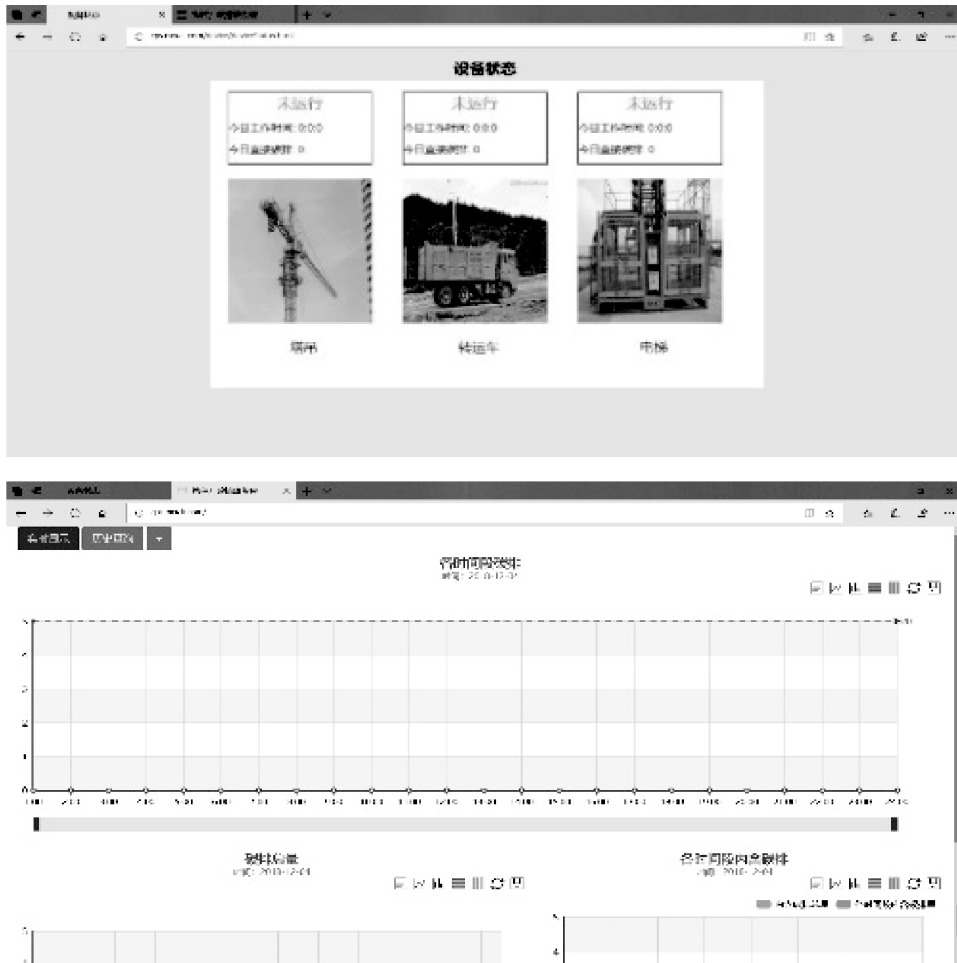


图 5 Web 端功能界面图

Fig. 5 Functional interface diagram of the Web side

## 5 结 论

文中通过对现有碳排放计算方法的分析及 CPS 技术的分析,明确了针对施工现场碳排放进行实时监测与可视化的研究目的。通过对施工现场碳排放源进行详细梳理,确定以施工现场各类施工机械在运行过程中产生的碳排放为计算边界;同时,作为初步探索,选取了 3 类具有代表意义的机械——塔式起重机、施工电梯及转运车为主要研究对象,建立了相应的计算逻辑;最后,明确了系统各部分的功能与交互逻辑,并从硬件系统及软件系统两方面介绍了系统的开发,从而实现了施工现场碳排放数据的实时监测与可视化。系统的开发有利于管理人员对施工现场碳排放规律进行更直观的了解,从而指导相关决策;施工机械状态的可视化也有助于现场人员及时发现并处理设备空转等问题,提高设备管理效率;同时,对施工机械运行时间的统计不仅可用于碳排放的计算与监测,还将有利于现场的施工调度及机械台班消耗量定额的修正;此外,CPS 技术在施工现场的应用为实现智慧工地及数字化施工提供了良好的借鉴。

## 参考文献:

- [1] Edenhofer O, Seyboth K. Intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. Encyclopedia of Energy, Natural Resource and Environmental Economics, 2013(1): 48-56.
- [2] 韩一宁,袁永博. 基于能量理论的建筑碳排放量核算模型研究[J]. 工程管理学报, 2014, 28(2): 6-10.  
HAN Yining, YUAN Yongbo. A CO<sub>2</sub> emission calculation model for buildings based on energy theory[J]. Journal of Engineering Management, 2014, 28(2): 6-10. (in Chinese)
- [3] 晏永刚,任宏,况玥. 区域碳排放变化的驱动因素、分解模型与实证研究[J]. 重庆大学学报, 2011, 17(4): 19-24.  
YAN Yonggang, REN Hong, KUANG Mingyue. Driving factors, decomposition analysis model and empirical study on regional carbon emissions change[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 17(4): 19-24. (in Chinese)
- [4] 刘猛,李百战,姚润明. 水泥生产能源消耗内含碳排放量分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(3): 116-120, 131.  
LIU Meng, LI Baizhan, YAO Runming, et al. Embodied carbon emission from energy consumption in the production of selected cement products[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(3): 116-120, 131. (in Chinese)
- [5] 张智慧,尚春静,钱坤. 建筑生命周期碳排放评价[J]. 建筑经济, 2010, 31(2): 44-46.  
ZHANG Zhihui, SHANG Chunjing, QIAN Kun. Carbon emission assessment of building life cycle[J]. Construction Economy, 2010, 31(2): 44-46. (in Chinese)
- [6] Zhan J, Liu W, Wu F, et al. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of urban residential buildings in Guangzhou city[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194:318-326.
- [7] Peng C H. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on ecotect and building information modeling[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 453-465.
- [8] Shiftehfar R, Golparvar-Fard M, Peña-Mora F, et al. The application of visualization for construction emission monitoring [C/OL]. Construction Research Congress. Virginia, USA: ASCE, 2010[2020-05-25]. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/411109%28373%29140>.
- [9] 李静,刘燕. 基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型[J]. 工程管理学报, 2015, 29(4): 12-16.  
LI Jing, LIU Yan. The carbon emission accounting model based on building lifecycle [J]. Journal of Engineering Management, 2015, 29(4):12-16. (in Chinese)
- [10] Zhang X C, Wang F L. Assessment of embodied carbon emissions for building construction in China: Comparative case studies using alternative methods[J]. Energy and Buildings, 2016, 130: 330-340.
- [11] Stephan A, Stephan L. Life cycle energy and cost analysis of embodied, operational and user-transport energy reduction measures for residential buildings[J]. Applied Energy, 2016, 161: 445-464.
- [12] Hajibabai L, Aziz Z, Peña-Mora F. Visualizing greenhouse gas emissions from construction activities[J]. Construction Innovation, 2011, 11(3): 356-370.
- [13] Li H X, Zhang L M, Mah D, et al. An integrated simulation and optimization approach for reducing CO<sub>2</sub> emissions from on-site construction process in cold regions[J]. Energy and Buildings, 2017, 138: 666-675.
- [14] Davies P J, Emmitt S, Firth S K. On-site energy management challenges and opportunities: a contractor's perspective[J]. Building Research & Information, 2013, 41(4): 450-468.
- [15] 陈文奇. 信息物理融合系统的物理世界的建模方法[D]. 广州: 广东工业大学, 2015.  
CHEN Wenqi. Modeling approach of physical world for cyber-physical system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] Li L J, Chen K H. Quantitative assessment of carbon dioxide emissions in construction projects: a case study in Shenzhen [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141: 394-408.
- [17] Jingke Hong, Shen G Q, Feng Y, et al. Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: a case study in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 103:249-259.
- [18] Seo M S, Kim T, Hong G, et al. On-site measurements of CO<sub>2</sub> emissions during the construction phase of a building complex[J]. Energies, 2016, 9(8): 599.
- [19] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 2015年中国区域电网基准线排放因子[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2015.  
National Development and Reform Commission Climate Change Division. 2015 China regional power grid baseline emission factor [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2015. (in Chinese)