

装配式钢结构变电站物化阶段碳排放分析框架

周孝法¹ 刘奕¹ 忻渊中¹ 茹天云¹ 李树德² 朱丽娟² 张安山³ 周思成³1. 国网上海市电力公司 上海 200122; 2. 国网英大碳资产管理(上海)有限公司 上海 200126;
3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院 上海 200240

摘要: 基于绿色建造理念, 利用全生命周期评价理论对预制装配式钢结构变电站物化阶段进行碳排放分析。通过基于定额的分析方法, 对装配式建筑碳排放核算方法进行框架设计, 选取了原材料生产—加工—运输—施工的生命阶段作为系统边界, 并将该方法应用于某装配式钢结构变电站当中进行了碳排放核算, 应用效果显示该方法可以实现对装配式建筑施工碳排放的分析。

关键词: 装配式建筑; 碳排放; 绿色建造; 全生命周期评价

中图分类号: TU741 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-1001(2023)10-2092-05 **DOI:** 10.14144/j.cnki.jzsg.2023.10.043

Carbon Emission Analysis Framework of Prefabricated Steel Structure Substation During Materialized Phase

ZHOU Xiaofa¹ LIU Yi¹ XIN Yuanzhong¹ RU Tianyun¹ LI Shude² ZHU Lijuan²
ZHANG Anshan³ ZHOU Sicheng³

1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

2. State Grid Yingda Carbon Asset Management (Shanghai) Ltd., Shanghai 200126, China;

3. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: Based on the concept of green construction, carbon emissions analysis of prefabricated steel structure substations during materialized phase is conducted using the whole Life Cycle Assessment (LCA) theory. By using a quota based analysis method, the framework design of the carbon emission accounting method is carried out for prefabricated buildings. The life stage of raw material production, processing, transportation and construction is selected as the system boundary, and this method is applied to a prefabricated steel structure substation for carbon emission accounting. The application results show that the method can achieve the analysis of carbon emissions for prefabricated building construction.

Keywords: prefabricated buildings; carbon emission; green construction; Life Cycle Assessment

目前, 地球气候恶化是人类面临的关键性问题, 随着世界碳排放量的不断增加, 温室效应愈发严重, 对地球生命构成巨大威胁。为了推动人类的可持续发展, 构建人类命运共同体, 我国提出在2030年前碳排放达到峰值, 努力争取在2060年前实现碳中和, 即“双碳”目标。为了实现这一承诺, 全国各行业都需要进行相关的碳排放管理。

近年来, 中国电力领域在装机容量和发电量上均有重大进展, 是当今世界电力生产与消费大国。由于电力行业的碳排放管理水平对于全国的碳排放达峰进度有很大影响, 因此, 电力行业应该主动承担起实现“双碳”目标的重要责任。虽然电力行业目前在低碳发展方面已经产生了

很多成绩, 但是行业的碳排放量依然在持续增长, 需要更努力地推动电力行业的碳达峰进程。

我国每年进行了大量的电力基础设施建设, 然而, 随着国家城镇化的不断推进和发展, 目前我国对电力基础设施建设的需求依然很大。加速建设供电基础设施, 稳步提高供电需求保障能力, 是实现社会经济高质量发展的必要基础。因此, 电力基础设施的建造阶段碳排放也是不容忽视的部分。在电力基础设施当中, 变电站土建工程是重要的内容之一。

随着建造技术的发展, 装配式建造方式被作为一种节能和绿色的方法被越来越多地应用于变电站的建造过程当中。装配式建造方式是指将变电站的结构和围护构件在工厂中进行预制生产, 再将预制生产的构件运输到施工现场后进行拼接安装的建筑方式。该方法可以缩短现场施工时间, 减轻现场劳动力负担, 同时减少能耗和建筑垃圾, 可以实现施工建设阶段的碳减排, 被认为是一种绿色可持续的电网设施建造方式^[1]。

作者简介: 周孝法(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师。

通信地址: 上海市浦东新区银城路300号(200120)。

电子邮箱: jackiezhou_no.1@163.com

收稿日期: 2023-07-04

目前,国内外对变电站的碳排放核算有一些研究。唐忠达^[2]通过对110 kV变电站进行阶段划分,对全生命周期碳排放进行了分析,然而该变电站的预制混凝土量很少;胡亚山等^[3]基于BIM数字化手段分别计算了混凝土结构和钢结构变电站的全生命周期碳排放;王卓^[4]以典型的110 kV变电站设计方案为例,利用全生命周期碳足迹模型对变电站方案进行了量化;Wei等^[5]采用投入产出分析和过程分析相结合的综合方法,揭示了中国典型特高压变电站显著的能源成本和碳排放。然而,目前国内外针对装配式变电站的碳排放研究还很少。

国内外对于装配式民用建筑碳排放的研究较多,曹西等^[6]基于建筑碳排放核算模型对现浇建筑与装配式混凝土建筑的碳排放进行比较分析,发现装配式建筑相比现浇建筑单位面积可减少碳排放量7.67 kg;李萌萌等^[7]基于碳排放系数法建立了装配式建筑的碳排放核算模型,并分析了影响装配式建筑碳排放的重要因素;范丛昕^[8]基于《装配式建筑碳排放核算及减排策略研究》中的理论,进行了碳排放核算案例分析,同时对装配式建筑的进一步可持续发展策略给出建议;Liu等^[9]还提出了利用传感网络搭建监测施工过程中碳排放CPS系统的方法以监测装配式建筑施工过程的碳排放;Li等^[10]提出了一种对关键预制构件进行碳足迹核算的方法,并对预制装配式楼梯产品的全生命周期碳足迹进行了研究。

目前,国内关于装配式变电站建设工程的环境影响研究尚少,且大多局限于过程分析法,分析系统边界不够全面,对数据统计多有遗漏。而有关材料的隐含能系数,也大多基于生产过程,而非综合隐含能系数。本文引入生命周期评价(life cycle assessment, LCA)理论,结合预制装配式变电站的特点,基于工程量清单选取合适的计算方法并确定分析的系统边界。确定预制装配式变电站建设过程中对环境影响较大的类型和阶段,分析影响碳排放的因素,探讨预制装配式混凝土变电站优势的具体体现。

1 LCA评价方法

LCA是自20世纪60年代开始发展的重要环境管理工具,其中生命周期是指产品从材料生产、使用、报废的整个过程,LCA分析方法最早应用于工业产品的环境分析当中,随着LCA方法的逐渐成熟,该方法被越来越多的行业所认可。

产品碳排放的定义是指产品从其生产到最终生命结束的全生命周期温室气体的核算,以二氧化碳当量计。这里产品的含义很广泛,既包括具体的实体产品,也包括服务的系统。依据LCA的基本思想理论,产品的环境影响一般是从原材料生产、运输、使用和废弃回收等环节进行评价。随着LCA方法逐渐被各行业认可,建筑领域也越

来越多地应用LCA方法对其环境影响进行评价,在建设领域,环境影响评价包括了物化、运营、拆除和回收等阶段。本文拟针对装配式钢结构变电站全生命周期中的物化阶段进行碳排放的核算,通过对其碳排放进行核算,可以为变电站碳排放提供有效的管理,从而帮助制定科学的减碳策略。

目前,越来越多的建筑领域应用LCA方法,进行单体建筑的全生命周期环境影响评价。早在2009年,Bribián等^[11]就分析了LCA方法在建筑领域进行应用的优势和阻碍;Xu等^[12]利用建筑BIM模型和LCA模型实现对装配式建筑隐含碳的评估;郑晓云等^[13]基于LCA方法对某轻钢装配式集成别墅全生命周期碳排放水平进行了研究;孟庆成等^[14]利用LCA周期方法对3D打印的建筑碳排放量和减碳效果进行了分析。然而,在电力行业基础设施建设领域,基于LCA的碳排放的研究还很少。

2 装配式变电站的特点

装配式施工方式起源于西欧,最早应用于住房建设领域。因为施工速度快、施工人员需求少,曾经出色地解决了世界大战之后人们短期住房紧张的问题。美国、法国、日本在该领域都有较为成熟的经验,目前日本的装配式建筑占比已达所有混凝土建筑的一半左右^[15]。随着我国建筑工人老龄化加快、施工绿色化水平要求高,装配式的施工方法也越来越多地得到推广。

除了住房建设领域,变电站的建设也越来越多地应用装配式结构建设方式。目前主要存在2种形式的装配式建筑,一种是预制混凝土装配式建筑,另一种是装配式钢结构变电站建筑。预制混凝土结构变电站相较于现浇混凝土结构变电站,在施工工艺、施工管理、节约人力、可持续性等方面的表现上都有较明显的优势。而且由于装配式建筑构件的标准化,非常有利于实现生产工业化、建造标准化和信息化。基于这样的优势,它可以节省现场施工的人员、节省现场的能源和资源消耗,最终可以较好地实现建设低碳化。除了装配式混凝土变电站之外,近年来装配式钢结构变电站也开始被广泛推广与应用,其现场施工主要通过螺栓进行节点连接,安装速度快,施工质量易保证;同时钢结构本身可以回收实现可再生利用,在构件标准化、信息化管理等方面具有较大优势。

3 装配式建筑碳排放核算方法框架

3.1 系统边界和阶段划定

确定计算的边界是实现碳排放核算的第一步,包括确定研究对象和受众群体。依据LCA分析理论方法,变电站的全生命周期对于环境的影响评价需要涉及很多活动数据。对变电站全生命周期的过程进行碳排放核算数据评

价，需要明确不同生命周期阶段中的碳排放源头。通过对变电站全生命周期的调研可知，变电站的全生命周期包括材料设备生产阶段、工厂生产阶段、现场施工阶段、运维阶段和拆除回收阶段。

材料生产阶段涉及的碳排放源包括玻璃、水泥、钢材等建材加工制造消耗的能源所产生的碳排放；现场施工阶段主要涉及的碳排放源是施工机械设备、人员生活产生的碳排放；运维阶段主要涉及的碳排放源是通风、照明、采暖等用水、用能；拆除回收阶段主要涉及的碳排放源是拆除机械设备、现场人员生活产生的碳排放；另外，建材和设备的运输以及建筑垃圾和拆除垃圾的运输也会产生碳排放。不同阶段的碳排放源头各不相同，需逐一理清，系统边界划分和关键碳排放源如图1所示。针对不同的碳排放核算阶段的需求可以根据阶段划分，只选择其中的一个或者几个阶段进行分析，而本文主要分析输变电工程建设阶段的碳排放，涉及建材和构件生产、现场施工和运输阶段。

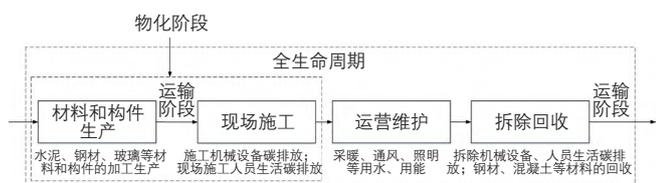


图1 变电站全生命周期碳排放评价系统边界和阶段划分

基于对装配式钢结构变电站建设流程分析，识别关键的碳排放环节和步骤。步骤包括建材和预制构件生产、建材运输、现场施工，分别对应不同的碳排放阶段，整个碳排放结构分析如图2所示。最终将这些步骤和环节主要涉及的电能、柴油、汽油、天然气、煤炭等碳排放源头进行汇总，为碳排放的核算提供基础的数据支持。具体汇总情况如表1所示^[16]。

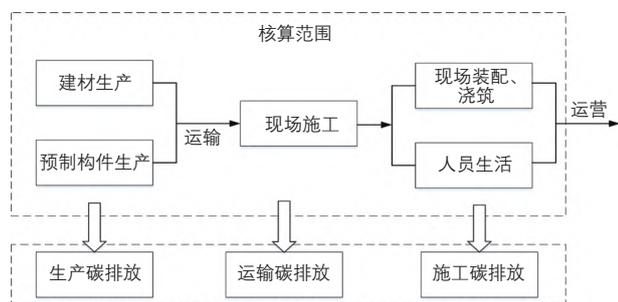


图2 预制装配式变电站核算碳排放分析系统边界

3.2 计算方法确定

目前，将全生命周期环境影响分析应用于装配式变电站的研究还比较少，且装配式变电站在我国应用时间也比较短，国内针对预制装配式变电站利用LCA进行碳排放评价分析的研究还比较少。利用LCA的碳排放评价方法目前

表1 预制装配式变电站碳排放重点分析环节

阶段	主要构件、材料和使用工具	主要涉及的碳排放源
材料和构件生产	混凝土、钢材、保温材料等材料的生产以及预制构件的加工	电能、柴油、汽油、天然气、煤炭等
材料和构件运输	建材和构件从生产场地运输到施工现场使用的运输车辆产生的碳排放	
现场施工	施工机械设备的使用以及现场人员生活产生的碳排放	

主要有过程分析法和投入产出法；对于环节复杂、施工过程中变化情况较多、难以把控的环节使用投入产出法，其优点是计算方便准确，但是投入-产出法所需要的数据一般要从完整的预制装配式产业角度获取，对于过程展示不够详细；对于过程清晰、方便理清的过程使用过程分析法，其优点是可以对具体施工环节提供具体指导。本文的研究目的是从更细致的划分阶段来比较预制装配式与现浇施工方法的碳排放水平，因此，基于过程分析法的建筑LCA碳排放分析更加适用于本研究。本文给出对装配式变电站碳排放进行核算的方法。

3.2.1 建筑材料碳排放

建材碳排放利用碳排放因子法进行核算，材料的碳排放量合计按照式（1）进行计算。

$$Q_{co_2} = \sum_{i=1}^m Q_i \times F_{c,i} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (1)$$

式中： Q_{co_2} ——二氧化碳排放总量；

Q_i ——第*i*种材料的数量；

$F_{c,i}$ ——第*i*种材料的碳排放系数。

3.2.2 施工作业碳排放

本文基于施工清单定额，对变电站土建部分施工阶段各分部分项工程，设计文件中均有详细工程量清单与之对应。因此，可根据工程量清单查询定额进行施工前预算。本文提出应用碳排放因子法，将施工作业产生的碳排放归纳为水、电、汽油、柴油、天然气等。这些物质消耗的来源主要有3个方面（图3）：一是机械碳排放，机械设备用电和燃料消耗会产生碳排放；二是现场施工人员的生活和办公会消耗电能、燃气和水；三是主体结构的浇筑和养护需要现场的水资源消耗。将以上3个方面产生的资源进行综合归纳，再按照碳排放因子法进行碳排放核算。

同时也可以按照以下方法对施工不同方面的碳排放进行计算，具体计算方法如下。

1) 机械碳排放。对于该部分的碳排放，应考虑施工部分工程量清单中的项目名称、项目特征描述、工程内容查询定额确定各项目建造阶段对应机械种类、机械台班、施工用水以及人工工日，结合预算工程量计算，分别使用 C_{jzjx} 、 C_{jzwm} 和 C_{jzrg} 表示机械、用水、人工3种碳排放源的碳排放量。

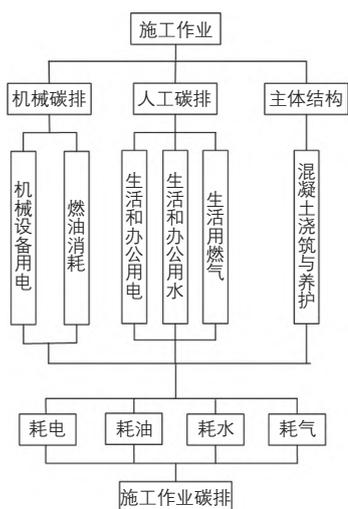


图3 装配式建筑施工作业碳排放

使用施工机械消耗能源产生的碳排放量如下式所示：

$$C_{jzjx} = \sum_{i=1}^n M_i C_{jx, i} \quad (2)$$

$$C_{jx, i} = \sum_{j=1}^m Q_{i, j} N_{i, j} F_{e, i, j} \quad (3)$$

式中： E_i ——第*i*个项目的工程量，宜参考施工部分工程量清单计算；

$C_{jx, i}$ ——第*i*个项目单位工程量使用施工机械消耗能源产生的碳排放量，kg/工程量计量单位；

$Q_{i, j}$ ——第*i*个项目单位工程量第*j*种施工机械台班消耗量，台班/工程量计量单位；

$N_{i, j}$ ——第*i*个项目第*j*种施工机械台班的能源用量，kW·h/台班或kg/台班；

$F_{e, i, j}$ ——第*i*个项目第*j*种施工机械台班所用能源的碳排放因子，kg/(kW·h)或kg/kg；

2) 人员碳排放。人员碳排放可根据工程量清单，按下式计算：

$$C_{rg} = \sum_{i=1}^n M_i P_i F_{p, i} \quad (4)$$

式中： M_i ——第*i*个项目的工程量；

P_i ——第*i*个项目单位工程所需的人工量，工日/工程量计量单位；

$F_{p, i}$ ——每工日人员生活产生的碳排放，其取值方法如下。

本文根据国家统计局2020年统计数据得到全国年度人员生活耗电和耗水量，计算得到人均每天耗电量约为2 kW·h，耗水量约为0.169 m³。因此，可以得到每工日人员生活碳排放：

$$P_{Fi} = 2.07 \times 0.7035 + 0.169 \times 0.168 = 1.44 \text{ kg}$$

3) 施工用水产生的碳排放量可按下式计算：

$$C_{jzw} = \sum_{i=1}^n M_i W_i F_{w, i} \quad (5)$$

式中： M_i ——第*i*个项目的工程量；

W_i ——第*i*个项目单位工程量的施工用水量，t/工程量计量单位；

$F_{w, i}$ ——水的碳排放因子，kg/t。

3.2.3 材料运输

该部分的碳排放应参考工程量清单中设备或建材数量、设备型号、运输车辆承载能力以及运距进行核算。该部分施工前预算的碳排放量可表示为式(6)：

$$C_{jz2} = \sum_{i=1}^n v_i D_i T_i \quad (6)$$

式中： v_i ——第*i*种设备或材料的总工程量，t或m³；

D_i ——第*i*种设备或材料的平均运输距离，km；

T_i ——第*i*种设备或材料的运输方式下，单位质量运输距离的碳排放因子，kg/(t·km)。

4 案例分析

为了研究装配式变电站施工碳排放水平，本文以上海某110 kV钢结构装配式变电站为例，根据本文提出的方法，计算该变电站的碳排放。本输变电工程中变电站工程建筑面积2 525 m²，地下1层，地上2层，是比较典型的钢结构装配式变电站。下面依照本文给出的框架内容，对该变电站物化阶段的碳排放量进行核算。

4.1 案例碳排放核算

4.1.1 材料隐含碳排放

按照前文的方法和分析，本案例选取本文的系统分析边界，并基于工程量清单数据，利用过程分析法进行数据的计算处理。收集案例变电站工程中主要材料的数量，包括钢材、混凝土、保温材料和砂浆等，并根据材料密度计算各材料的质量。

在GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》中，规定了一些碳排放因子，对于这些材料直接利用该数值。但是仍然有很多材料碳排放系数值还没有统一标准，对于这些碳排放系数，本文通过查阅文献，筛选数据，取平均值确定其碳排放系数，本文计算采用的碳排放系数如表2所示^[16]。

表2 不同材料碳排放系数

材料名称	钢材	混凝土	保温材料	砂浆
材料碳排放系数参考值	2.35 kg/kg ^[17]	295 kg/m ³ ^[17]	11.20 kg/kg ^[18] 11.20 kg/kg ^[19] 17.10 kg/kg ^[20]	0.11 kg/kg ^[18] 0.11 kg/kg ^[19]
平均值	—	—	13.17 kg/kg	0.11 kg/kg
最后取值	2.35 kg/kg	295 kg/m ³	13.17 kg/kg	0.11 kg/kg

根据工程量清单，案例中预制装配式变电站现场现浇

部分的物料清单如表2所示。按照式(1)得到计算结果如表3所示。

表3 “某110 kV变电站土建新建工程”装配式建筑材料碳排放总量

材料名称	材料数量	碳排放因子	碳排放量/t
钢材	1 053.53 t	2.35 kg/kg	2 475.80
混凝土	3 438.92 m ³	295 kg/m ³	1 014.48
保温材料	59.65 t	13.17 kg/kg	785.59
砂浆	584.602 4 t	0.11 kg/kg	64.31
合计	—	—	4 340.17

4.1.2 运输过程碳排放量

根据图1可以看出,装配式变电站的运输能耗包括了部分材料从材料产地到预制构件厂的运输及预制构件厂到施工现场的运输以及施工废弃物运输。本案例为装配式钢结构变电站,需要考虑钢构件运输到场所产生的碳排放,运输距离假设混凝土、砂浆、施工废弃物为40 km,钢材保温材料假设500 km。

按照每100 m²建筑面积产生2 t施工废弃物计算,则本变电站施工产生废弃物约50.5 t。假设考虑公路运输,利用载重量为8 t的中型载重汽油货车运输,选取车辆运输的碳排放系数为0.115 kg/(t·km)^[17],施工现场一垃圾处理点距离约20 km,则按照式(6)方法计算得施工废弃物运输碳排放量约为:

$$C_T = 50.5 \times 20 \times 0.115 = 116.15 \text{ kg}$$

按照相同方法计算得到建筑材料和施工废弃物碳排放量如表4所示。

表4 “某110 kV变电站土建新建工程”装配式变电站运输碳排放

材料类别	产地—施工现场/km	运输车辆碳排放因子/(kg/t·km)	碳排放量/kg
混凝土	40	0.115	4.85
钢材	500	0.115	197.74
保温材料	500	0.115	3.43
砂浆	40	0.115	2.69
施工废弃物	40	0.115	0.23
合计	—	—	208.94

4.1.3 施工过程碳排放

现场施工阶段的能源消耗选取了油耗、水耗、电耗和煤耗进行分析。

汽油和柴油消耗主要为场内运输、施工机械设备的消耗。水耗主要为混凝土养护、车辆清洗及施工人员生活用水。电耗为现场施工机械设备及施工人员生活用电。碳排放系数按照GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》中给出的数值采用,则整个装配式变电站由于能源和水资源消耗产生的碳排放计算如表5所示。

表5 施工过程能源消耗和水资源消耗碳排放

项目	碳排放因子	资源、能源消耗量	碳排放量/t
电	0.7035 kg/(kW·h)	925 144.40 kW·h	650.84
柴油	2.171 kg/kg	83 878.03 kg	182.10
汽油	2.031 kg/kg	2 815.68 kg	5.72
水	0.618 kg/t	550.94 t	0.34
合计	—	—	839.00

4.2 碳排放结果分析

根据前面计算的结果,将本项目的碳排放按生产阶段、运输阶段和现场施工阶段进行归类。本装配式变电站的各阶段碳排放量占比情况如图4所示,可知装配式钢结构变电站建设阶段碳排放主要碳排放源头为建材生产,其次为现场施工。

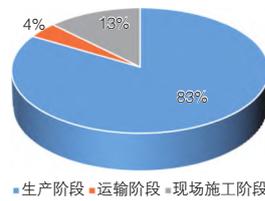


图4 不同阶段碳排放占比

5 结果与讨论

本文基于绿色建造理念,从碳排放角度对装配式钢结构变电站的建造进行了碳排放定量评价。提出了对变电站建设阶段碳排放进行定量分析的方法,并对某110 kV变电站进行了定量核算,得到如下结论:

1) 装配式钢结构变电站碳排放主要来源为建材的生产,现场施工和运输产生的碳排放较少。因此,要实现对变电站的碳减排,选择合适的低碳化材料是十分重要的。

2) 核算过程中存在缺少适用于变电站碳排放核算的权威性碳排放因子,本文选择了使用多文献平均值的方法进行计算,存在一定误差。因此,构建适用于变电站工程的碳排放因子库对于准确计算变电站碳排放十分重要。

3) 在未来,对材料进行回收再利用,大力发展绿色低碳建造技术,对变电站建设期的碳减排十分重要。

参考文献

[1] 曾文慧.绿色低碳变电站设计关键[J].中国电力企业管理,2022(30): 25-27.
 [2] 唐忠达.110 kV变电站生命周期碳排放分析[J].电工电气,2021(8): 35-38.
 [3] 胡亚山,庄典,朱可,等.混凝土结构与钢结构变电站建筑全生命周期碳排放对比研究[J].建筑科学,2022,38(12):275-282.
 [4] 王卓.基于全生命周期的110 kV变电站降碳方案研究[J].电工电气,2022(1):66-69.

(下转第2100页)

4 总结与思考

4.1 土方平衡实施工期及经济效益

通过群体工程错峰施工土方平衡策划,在3个月内完成了40万 m³的土方工程开挖,同时还完成种植土与普通回填土的分类工作。仅1年9个月完成了全部回填工作,工程进度推进顺利,无二次短驳或土方外运问题工程进度事项发生。实际工程进度节点相比原定计划提前1个月,取得了非常好的实施效果。

采用群体工程错峰施工土方平衡方案,相比外运方案,共计节约造价5 625万元,取得较好的经济效益。

4.2 土方平衡过程的得失

通过综合评估与分析,西湖大学建设工程PPP项目土方工程最终采用群体工程错峰施工土方平衡方案。合理地安排单体错峰施工,大大降低了土方临时堆卸点的场地规模,在确保了工程进度的前提下,节约了大量土方外运造价。施工过程中的有效施工管理,使得现场施工维持在较高文明施工水平,项目获评浙江省标化工地荣誉。

土方平衡在前期未考虑钻孔灌注桩的泥浆干化土、土的松实系数取值过小,使得前期对土方平衡过于乐观,各种因素叠加导致无土方外运选项,是前期策划的缺失点。虽然最终仍然完成了土方平衡的任务且收获了较好的效益,但回溯建设过程,显然存在土方外运条件时能给现场留有更多的余地。

4.3 土方平衡未来应用展望

随着人工智能及大数据的应用,也许动态的土方平衡可以在多个相邻项目间完成,综合来看,将大大减少投资的综合成本。如有可能,这将扩大这项施工技术的应用面,不再局限于有较大占地面积的工程。

参考文献

- [1] 田达松.阳抽水蓄能电站土石方平衡规划研究[J].水利发电,2010,36(7):55-57.
- [2] 王素芳.建设项目施工全周期土方平衡分析及实践[J].建筑技艺,2010(增刊1):271-272.
- [3] 杨建成.生产建设项目土石方平衡探讨[J].中国水土保持,2012(5):62-65.
- [4] 王桂峰.五里河综合治理工程土石方平衡分析[J].吉林水利,2008(9):58-60.
- [5] 李志斌.南水北调工程土石方平衡技术的应用与研究[J].四川水力发电,2011,30(6):138-142.
- [6] 李冬州.浅析土方平衡分析计算与合理调配在水利工程项目施工中的运用[J].江苏水利,2012(2):18-20.
- [7] 蔡剑波.深圳某工厂土方平衡工程设计实例分析[J].市政技术,2010,28(5):130-132.
- [8] 傅铤.线性规划在渠道土方平衡调配中的应用[J].科学之友,2008(5):8-9.
- [9] WEI W, WU X, LI J, et al. Ultra-high voltage network induced energy cost and carbon emissions[J]. Journal of Cleaner Production, 2018,178:276-292.
- [10] 曹西,缪昌铅,潘海涛.基于碳排放模型的装配式混凝土与现浇建筑碳排放比较分析与研究[J].建筑结构,2021,51(增刊2):1233-1237.
- [11] 李萌萌,陈为公,李龙.装配式建筑物化阶段碳排放计算及影响因素研究[J/OL].安全与环境学报:1-10[2023-03-21].https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2022.1045.
- [12] 范丛昕.碳达峰碳中和视域下装配式建筑节能减碳研究[J].工业建筑,2022,52(4):257.
- [13] LIU G, CHEN R, XU P, et al. Real-time carbon emission monitoring in prefabricated construction[J]. Automation in Construction, 2020, 110(3):102945.
- [14] LI X J, XIE W J, C Y J, et al. Holistic LCA evaluation of the carbon footprint of prefabricated concrete stairs[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,329:129621.
- [15] BRIBIÁN I, USÓN A A, SCARPELLINI S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification[J]. Building and Environment, 2009, 44(12):2510-2520.
- [16] XU J Y, TENG Y, PAN W, et al. BIM-integrated LCA to automate embodied carbon assessment of prefabricated buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2022,374:133894.
- [17] 郑晓云,徐金秀.基于LCA的装配式建筑全生命周期碳排放研究:以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例[J].建筑经济,2019,40(1):107-111.
- [18] 孟庆成,胡垒,李明健,等.基于LCA法的3D打印建筑碳排放量及减碳效果分析[J].安全与环境学报,2023,23(7):2523-2533.
- [19] 李滨.我国预制装配式建筑的现状与发展[J].中国科技信息,2014(7):114-115.
- [20] 宫婷.建筑全生命周期下的碳排放研究[D].上海:上海交通大学,2017.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑碳排放计算标准:GB/T 51366—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [22] 刘洪斌,彭雄,刘美霞,等.预制装配与现浇模式住宅建造节能减排评测比较[J].工程建设与设计,2016(4):17-20.
- [23] 刘美霞,武振,王洁凝,等.住宅产业化装配式建造方式节能效益与碳排放评价[J].建筑结构,2015,45(12):71-75.
- [24] 熊宝玉.住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究[D].深圳:深圳大学,2015.

(上接第2096页)