

# 大型公共建筑工程 LCA 模型下的碳排放敏感性分析

陶源<sup>1,2</sup> 刘伟军<sup>2</sup>

**【摘要】**为有效控制大型公共建筑各阶段碳排放量,本文基于 LCA 模型及 PKPM-CES 建筑碳排放设计分析软件,采用碳排放因子法,对某大型博览馆项目全生命周期的碳排放量进行了核算。提取核算结果中碳排放集中阶段的各影响因素,分析其敏感性与影响程度并对比项目优化前后的碳排放量,验证其满足规范要求的碳排放指标后,提出此类建筑 LCA 理念下相对高效的减碳技术。

**【关键词】**大型公共建筑; 建筑工程全生命周期; 碳排放核算; 敏感性分析

## 0 引言

建筑业发展带来的能源消耗及过量的碳排放是影响全球气候变化的重要因素,据统计,我国公共建筑能耗占比较大,占我国建筑业碳排放比重的 51.3%<sup>[1]</sup>,而大型公共建筑体量近几年增长迅速。因此,如何行之有效地减少大型公共建筑的碳排放量已经成为世界各国学者的研究热点。生命周期评价(life cycle Assessment, LCA)方法是结合我国建筑能源系统的实际特点,分别建立了系统设备材料综合生产、安装施工、运行维护以及拆除处置阶段的能耗和 CO<sub>2</sub> 排放计算数学模型<sup>[2]</sup>。丁云<sup>[3]</sup>等以绿色建筑三星项目——宜昌规划展览馆为例,对项目采用的 24 种绿色低碳设计技术进行全面分析,并测算项目全生命周期的碳排放量,得知碳排放主要集中在建筑物使用和建料生产阶段,而建筑施工及拆除阶段碳排放量较少。相比之下大型公共建筑碳排放量明显高于住宅、别墅等普通公共建筑。本文以生命周期评价理论为研究基础,将江苏省某大型博览馆项目作为工程依托,根据其 LCA 模型下碳排放量核算结果,进行下一步分析研究。

## 1 LCA 模型下碳排放量的核算方法

### 1.1 碳排放核算边界

大型公共建筑一般指建筑面积超过 20000m<sup>2</sup>且采用集中空调、采暖、照明等复杂能源系统的建筑。此类建筑 LCA 模型下的碳排放核算范围应覆盖建筑物从摇篮到坟墓的整个过程,计算所消耗能源和材料产生的二氧化碳排放总和。李同燕<sup>[4]</sup>等对大型公共建筑全生命周期碳排放核算与评价的范围进行了界定,总结了大型公共建筑材料生产、加工、运输和项目建造的过程为物化阶段、建筑使用及内部能源循环的过程为运行阶段,物化及运行阶段也成为大型公共建筑碳排放数据影响较大的主要阶段。

### 1.2 碳排放核算模型

本核算模型数据源于江苏省某大型博览馆建筑的实际工况数据,基于 PKPM-CES 软件模拟、LCI 数据库及《建筑碳排放计算标准—GB/T 51366—2019》<sup>[5]</sup>相关条款,采用碳排放因子法进行碳排放核算,建立了建筑全生命周期碳排放核算模型,即:

$$C_{LIFE} = C_{PC} + C_{op} + C_{CC} \quad (1)$$

式(1)中: C<sub>PC</sub>、C<sub>op</sub>、C<sub>CC</sub>分别为建筑物物化阶段、运营阶段、拆除阶段的单位建筑面积年总碳排放量, kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, 以下主要介绍建筑物物化与运营阶段的碳排放算法:

$$C_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{jz-i}, EF_i)}{A} \quad (2)$$

式(2)中: E<sub>jz-i</sub>—第 i 种能源总用量(kWh 或 kg);  
A—建筑面积(m<sup>2</sup>)。

EF<sub>i</sub>/j—第 i 种主要建材的消耗量或第 i 类能源的碳排放因子(kgCO<sub>2</sub>/kWh 或 kgCO<sub>2</sub>/kg),按文献[5]附录 A 确定。

$$C_{op} = \frac{[\sum_{i=1}^n (E_i \cdot EF_i) - C_p] \cdot y}{A} \quad (3)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (4)$$

式(3)中:

E<sub>i</sub>—建筑第 i 类能源年消耗量(单位/a);

C<sub>p</sub>—建筑绿地碳汇系统年减碳量(kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>);

式(4)中:

E<sub>i,j</sub>—j 类系统的第 i 类能源消耗量(单位/a);

y—建筑设计寿命(a);

ER<sub>i,j</sub>—j 类系统消耗由可再生能源系统提供的第 i 类能源量(单位/a)。

## 2 案例工程碳排放统计

选取江苏省某大型博览馆项目作为实例研究对象,建筑地处南京市新区核心位置,地上四层,总高 30.25 m,总建筑面积为 25 156.2m<sup>2</sup>。建筑功能为办公、展厅及休息区,主体采用“钢筋混凝土+钢结构”及部分钢木混合砌块的组合结构,屋顶设有集中空调、采暖系统、复杂照明系统、太阳能热水系统等。基于上述构建的碳排放 LCA 核算模型,运用软件 PKPM-CES 计算建筑使用寿命为 50 年的碳排放结果如表 1 所示。

表 1 建筑全生命周期(50 年)各分项总量与单位面积碳排放量

LCA 模型建筑各经历阶段	碳排放总量 (tCO <sub>2</sub> e)	单位面积碳排放 (tCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )	占比 /%
物化阶段	+19 757.94	+0.790	+18.50
运行阶段	+86 803.19	+3.453	+81.46
拆除阶段	+253.58	+0.010	+0.04
总计	+106 819.72	+4.253	+100.0

## 3 敏感性分析结果与讨论

### 3.1 LCA 模型下的敏感性分析方法

基于上述核算结果可知,建筑全生命周期碳排放主要源于

建筑物化及运行阶段，故在此两阶段找寻减碳措施的不确定源，然而许多变量都是根据项目实际情况假设而得的，这种假设会导致不同的测算结果，从而产生误差。本节从敏感性分析的视角出发，研究各变量变化对模型输出结果的影响程度，把建筑碳排放结果的敏感性分析研究当成一个或多个不确定因素的变化，改变各个不确定性源的输入量，查看目标变量的波动情况并识别碳排放敏感因素。基于冯国会<sup>[6]</sup>总结的关于敏感性分析数理统计方法，其分析假设模型表示为：

$y = f(x_1, x_2, x_n)$  ( $x$  为不确定敏感因子)，敏感程度用敏感度系数表示，具体如公式(5)：

$$S = \frac{y(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - y(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} \quad (5)$$

式中：S—敏感度系数，表示碳排放随不确定敏感因子  $x$

的变化程度；

- $\Delta x_i$ —表示不确定敏感因子 ( $x$ ) 参数的微小扰动；
- $\Delta x_i/x_i$ —表示扰动幅度 (本次研究取：10% ~ 30%)；
- $y$ —模型输出量。

### 3.2 案例工程的敏感性分析过程

#### 3.2.1 物化阶段的敏感性分析

建筑物化阶段包括生产、运输以及建造过程，选择四种用量较大的建筑材料作为生产过程的变量敏感因子；建材输送工具配比率、运输距离、施工工期与装配化施工占比，作为其他过程的变量敏感因子。对上述敏感因子 ( $x$ ) 分别上升或下降 10%、20% 和 30% (变化率 0% 时为该阶段原碳排放量  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ )，计算敏感因子  $x$  对案例建筑物化阶段的碳排放影响，具体影响程度如表 2 所示。

表 2 物化阶段敏感度系数情况

物化阶段各过程	不确定敏感因子 ( $x$ )	变化率 /%							敏感度系数 (S)
		-30	-20	-10	0	10	20	30	
生产过程	混凝土	616.02	616.61	617.15	617.63	618.11	618.65	619.24	0.1007
	钢材、钢筋	614.83	615.98	616.9	617.63	618.36	619.28	620.43	0.1677
	水泥砂浆	616.75	617.13	617.42	617.63	617.84	618.13	618.51	0.0515
	钢木混合砌体	617.09	617.3	617.48	617.63	617.78	617.96	618.17	0.0330
运输过程	轻重运输工具	127.88	127.93	127.98	128.02	128.06	128.11	128.16	0.0431
	运送距离	127.88	127.94	127.98	128.02	128.06	128.11	128.16	0.0411
建造过程	施工工期	39.81	39.866	39.92	39.97	40.02	40.07	40.13	0.1591
	施工装配率	39.9	39.926	39.95	39.97	39.99	40.01	40.04	0.0586

#### 3.2.2 运营阶段的敏感性分析

建筑运营阶段的碳排放主要由建筑内部暖通空调、电气与控制、供水与排污系统工作期间所产生，同时，建筑外部园林绿化工程可抵消吸附一部分  $\text{CO}_2$  的产生，将绿化覆盖面积、

与上述分项系统的运行能效设为该阶段的敏感因子 ( $x$ )，分别上升或下降 10%、20% 和 30% 并计算敏感因子 ( $x$ ) 对案例建筑 LCA 模型下运营阶段的碳排放影响，具体影响程度如表 3 所示。

表 3 运营阶段敏感度系数情况

运营阶段各分项	不确定敏感因子 ( $x$ )	变化率 /%							敏感度系数 (S)
		-30	-20	-10	0	10	20	30	
暖通空调	燃气供暖系统运行	1012.91	1020.5	1025.69	1027.74	1029.79	1034.98	1042.57	0.4694
	通风空调系统运行	792.70	797.63	801.42	803.40	805.38	808.17	813.10	0.4344
	冷热源设备运行	1821.39	1824.77	1828.02	1831.14	1834.26	1837.51	1840.89	0.2101
电力与控制	照明系统运行	1260.57	1267.52	1272.14	1196.88	1277.16	1281.78	1288.73	0.3722
	强电与动力系统控制	1263.51	1268.76	1272.6	1196.88	1277.7	1281.54	1286.79	0.3229
	弱电信号系统控制	1271.9	1272.92	1273.83	1196.88	1275.47	1276.38	1277.40	0.0832
	电梯系统运行	78.724	78.749	78.763	78.77	78.777	78.791	78.816	0.0188
供水与排污	热供水系统运行	356.78	357.25	357.63	357.95	358.27	358.65	359.12	0.1224
	排污与处理工程运行	357.48	357.72	357.87	357.95	358.03	358.18	358.42	0.0436
园林绿化	绿地覆盖率	-13.273	-13.215	-13.17	-13.15	-13.13	-13.085	-13.027	0.3163

3.2.3 敏感性分析结果与评估

由表 2 展示的结果表明, 案例工程物化阶段建材生产过程中, 采用钢结构建材对该过程碳排放影响程度最大; 钢木混合砌块对该过程影响最小, 表明采取此类建材替代钢材可有效降低该过程碳排放量。建造过程中, 施工工期的浮动对该过程碳排放影响程度较大, 而施工装配率的改变对碳排放敏感度较低, 表明减少传统施工的占比可一定程度降低该过程的碳排放量。表 3 展示的结果表明, 提高运营阶段中供暖、空调、照明系统的能效或引入可再生能源可大幅降低该阶段的碳排放量, 其他因子敏感度浮动相近, 表明该过程的碳排放量可控范围有限。综合上述两表分析得出的敏感程度较大的几个因素对案例工程 LCA 模型下的总碳排放影响, 如图 1 所示可以看出, 各因子碳排放敏感程度排序为: 暖通空调系统能耗 > 电力控制系统能耗 > 钢结构建材生产量 > 园林绿化。

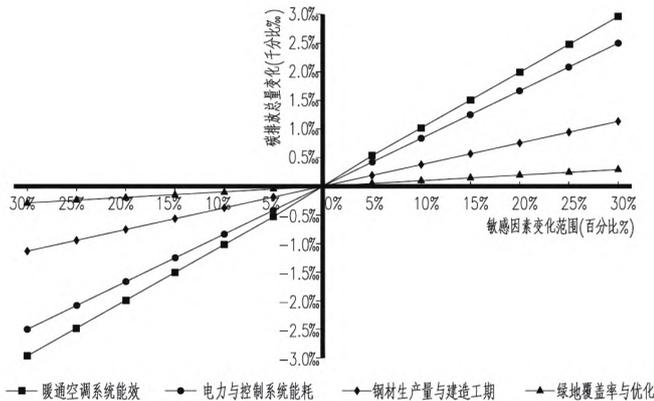


图 1 敏感因子的变化对单位面积碳排放量的影响程度

3.3 案例工程的减碳优化

根据已执行的《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB 55015-2021<sup>[7]</sup>, 新建的公共建筑碳排放应在原设计标准的基础上降低达到限值要求。由于案例工程已投入使用, 现阶段主要针对项目运营阶段照明、供暖与空调系统的能耗进行节能改造, 同时引入可再生能源系统。基于彭卓<sup>[8]</sup>提出的绿色建筑技术措施减碳率 EER (emission reduction rate), 以采用每项减碳技术后建筑的实际情况作为初始值, 对比没有采用这项技术时的碳排放情况, 以验证项目改造后, 碳排放降低强度与降低比例是否满足上述规范中的限值要求, 具体如表 4 所示。

4 结论

本文基于 LCA 方法理论及案例工程现场碳排放量的监测与核算, 对大型公共建筑碳排放关键阶段的影响因素进行了敏感性分析, 所得结论如下:

(1) 基于项目各阶段碳排放实测数据与建立的碳排放 LCA 核算模型, 最终得到大型公共建筑全生命周期 (50 年) 的单位面积碳排放量约为: 4.253tCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>, 主要集中于建筑物化与运营阶段。

(2) 根据对 LCA 核算结果中项目碳排放集中阶段的敏感性分析表明:

① 钢结构建材的生产对此类大型公共建筑物化阶段碳排放

表 4 改造前后建筑碳排放对比情况

类别	原设计建筑	改造建筑	优化比例 %	规范限值
全年供暖耗电量 (kWh)	683 436.87	638 544.42	6.57	-
全年供冷耗电量 (kWh)	523 594.33	423 062.83	19.20	
全年照明耗电量 (kWh)	859 340.38	683 406.34	20.47	
全年热供水耗电量 (kWh)	1 603.47	529.18	67.00	
全年可再生能源提供电量 (kWh)	-	133 875.89	100.00	
全年总耗电量 (kWh)	2 067 975.05	1 611 666.88	22.07	
单位面积年运行碳排放量 (kgCO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> ·a))	30.86	18.14	41.22	≥ 7
单位面积年运行碳排放降低值 [kgCO <sub>2</sub> / (m <sup>2</sup> ·a)]	12.720			
运行碳排放强度降低比例 (%)	41.218		≥ 40%	

影响敏感性较高, 应根据项目位置与资源情况选取可利用建材, 并提高项目施工装配率, 减短工期以达到减碳目的;

② 控制项目运营过程中产生的能源消耗是该阶段减碳的关键, 采用高效率的采暖、空调、照明系统的同时应提升建筑自然通风与自然光照明率, 并充分利用可再生能源系统以减少各系统的耗电量与减碳潜力, 成为大型公共建筑生命周期内减碳的重要过程。

(3) 经验证该大型公共建筑工程改造后, 单位面积年碳排放降低 12.72kgCO<sub>2</sub>/ (m<sup>2</sup>·a)、碳排放强度降低 41.21%, 同时项目全年总耗电量降低 22.07%, 均满足相关规范要求。

参考文献

[1] 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能 (中英文), 2021,49(02):1-6.

[2] 任志勇. 基于 LCA 的建筑能源系统碳排放核算研究 [D]. 大连理工大学, 2014.

[3] 丁云, 陈荣, 黄惊. 绿色低碳建筑设计实例分析——宜昌规划展览馆 [J]. 建筑节能, 2018,46(10):73-76.

[4] 李同燕, 孙锦, 史琳祺, 等. 大型公共建筑全生命周期碳排放核算及评价 [J]. 绿色科技, 2017(16):13-15+18.

[5] GB/T 51366-2019, 建筑碳排放计算标准 [S]

[6] GUAN J,ZHANG Z,CHU C. Quantification of Building Embodied Energy in China Using an Input-output-based Hybrid LCA Model[J]. Energy and Buildings, 2016,110:443-452.

[7]GB 55015-2021, 建筑节能与可再生能源利用通用规范 [S].

[8] 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(06): 436-441.

(作者单位: 长沙理工大学 交通与运输工程学院)

【中图分类号】TU201.5

【文献标识码】A

【文章编号】1671-3362 (2022) 09-0012-03