

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.05.003

基于 LCA 的轨道交通车站 碳排放分析

钱生泽

(中铁十八局集团第四工程有限公司, 天津 300222)

摘要: 建筑业作为碳排放最大的行业之一, 每年排放的 CO₂ 约占世界总排放量的 25%, 而建筑物化阶段和运营阶段是建筑全生命周期中排放量最大的阶段, 因此对这部分碳排放量化具有重要的研究意义。以某轨道交通车站为案例, 将建筑物化阶段进行分解, 建立单元工序的碳排放计算模型, 再对运营阶段的能耗进行分析, 最后集成得到整个工程的碳排放计算模型。通过案例分析发现, 建筑物化阶段中钢材的碳排放量占总材料碳排放的 50.84%; 机械碳排放中柴油占比最大, 为 70.62%; 而在人员碳排放中垃圾处理的碳排放所占比例达到 78%, 在车站运营阶段通风空调系统碳排放占比最大, 为 48.2%。根据计算结果, 从机械使用、施工方式、能源来源、运营方式等给出节能减排措施。

关键词: 轨道交通车站; 碳排放; 生命周期评价(LCA)

中图分类号: U217 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2022)05-0016-06

Carbon Emission of Rail Transit Station Based on Life Cycle Assessment

QIAN Shengze

(China Railway 18th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222)

Abstract: As one of the largest carbon emitters, the construction industry accounts for approximately 25% of the world's total CO₂ emissions each year. The building and operation phases account for the largest proportions of emissions throughout the entire life cycle of a building. Therefore, it is important to study the carbon emissions of these phases. This study uses a rail transit station as a case study, decomposes the building stages, establishes the carbon emission calculation model of the unit process, analyzes the energy consumption of the operation stage, and integrates outcomes to obtain the carbon emission calculation model of the entire project. Based on a case study, it is found that the carbon emission of steel in the building stage accounts for 50.84% of the total carbon emissions; the largest share of diesel in the mechanical carbon emission is 70.62%, while the carbon emissions of waste disposal in the personnel carbon emission reach 78%, and the largest share of ventilation and air conditioning system in the station operation stage is 48.2%. According to the calculation results, energy saving and emission reduction measures are presented in terms of machinery use, construction methods, energy sources, and operation methods.

Keywords: rail transit station; carbon emission; life cycle assessment (LCA)

收稿日期: 2021-11-23 修回日期: 2022-02-23

作者简介: 钱生泽, 男, 本科, 高级工程师, 从事城市轨道交通桥梁施工管理, 522013435@qq.com

基金项目: 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划(2020-C64)

引用格式: 钱生泽. 基于 LCA 的轨道交通车站碳排放分析[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(5): 16-21.

QIAN Shengze. Carbon emission of rail transit station based on life cycle assessment[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(5): 16-21.

1 绪论

近年来,全球变暖与大气颗粒物污染引起人们广泛关注。政府间气候变化专业委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)发布的《全球 1.5℃ 升温特别报告》指出^[1],全球变暖幅度达到 2℃ 将会带来比现在更严重的后果,包括对水资源、土地利用、粮食生产和人类健康的严重负面影响。建筑业是最大的能源消耗部门,也是温室气体排放部门之一。2020 年,全球建筑部门的 CO₂ 排放总量约为 117 亿 t^[2],该部门占全球最终能源消耗的 36% 和与能源相关的 CO₂ 排放量的 37%。所以,降低建筑领域的 CO₂ 排放对控制全球变暖与大气颗粒物污染至关重要。

大量研究表明,在建筑全生命周期中,运营阶段排放量最大,占总排放量的 70%~80%,物化阶段排放量占比为 20%~30%^[3]。虽然物化阶段整体环境排放占比较小,但建筑物化阶段持续时间较短,若考虑年均碳排放量,建筑物化阶段要大大超过建筑使用阶段的环境排放影响,因此建筑物化阶段与运营阶段的环境影响都不容小觑。在量化建筑环境排放时,研究人员常用生命周期评价(LCA)方法,国内外众多学者分别针对建筑的不同结构形式、地区、材料进行环境影响的对比分析。此外,物化阶段会有大量的相关人员参与其中,这些相关人员会在物化阶段的持续时间内产生大量 CO₂,因此将这一部分 CO₂ 纳入计算当中是十分必要的,而且也是碳排放计算中很重要的一部分,但是现有研究基本都忽略建筑工人在工地生活作业所产生的碳排放,为了解决这种问题,笔者充分考虑了人员的碳排放计算。

笔者首先将建筑物化阶段按照不同工序进行分解,建立单元工序的碳排放计算模型;然后对运营阶段的能耗进行分析,集成得到整个工程的碳排放计算模型;最后以某轨道交通车站为案例进行分析,验证了模型的可行性,并得到了该站房物化阶段和运营阶段的碳排放量。

2 全生命周期评价(LCA)研究方法

1990 年,国际环境毒理学和化学协会(international society for environmental toxicology and chemistry, SETAC)第 1 次使用“生命周期评价”概念。1993 年,国际标准化组织(international organization for standardization, ISO)成立环境管理标准技术委员会(TC207),LCA 被正式纳入 ISO 环境管理体系。同时,联合国环境规划

署(United Nations Environment Program, UNEP)也开始参与 LCA 研究,陆续发表了报告《LCA: 概念和方法》和《面向全世界的 LCA 应用》^[4]。

LCA 方法的实施框架最初由 SETAC 确定,该框架以三角形模型为基础,将 LCA 方法分为 4 个组成部分,如图 1(a)所示。其中目标与范围(goal and scope definition)明确了研究目的、功能单位和系统边界以及后续的指标选择^[5];清单分析(life cycle inventory analysis, LCI)选用了中国生命周期基础数据库(CLCD);影响评价(life cycle impact assessment, LCIA)采用中点破坏环境影响评价计算 CO₂ 排放。ISO^[6]在 SETAC 技术框架的基础上做了改进,删去了改善分析,添加了结果解释,并指出结果解释和前 3 个部分相互关联的关系。其完整的 LCA 也包含 4 个阶段,各阶段之间的相互关系如图 1(b)所示。

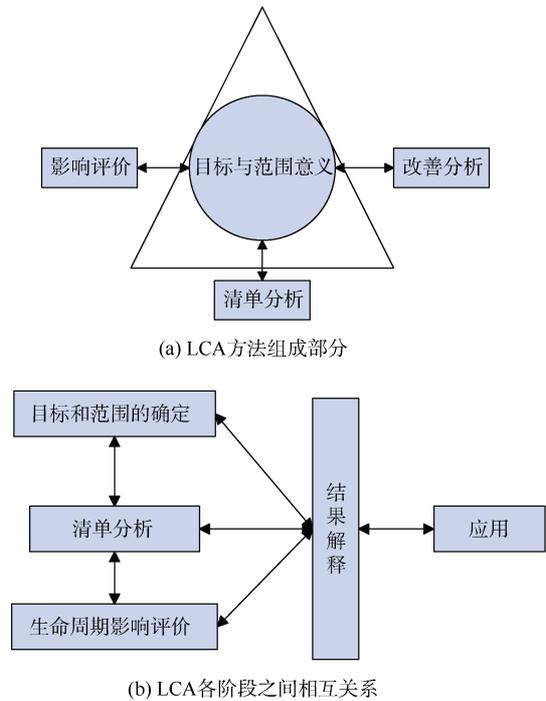


图 1 生命周期评价技术框架

Figure 1 Technical framework for life cycle assessment

3 建筑物化阶段环境排放计算模型

3.1 模型边界

3.1.1 物化阶段生命周期界定

建筑的整个生命周期可分为物化阶段、使用阶段和拆除阶段。其中物化阶段环境影响评价可以理解为“建筑工程 LCA”的组成部分,即可以把建筑工程物化阶段视为一种特殊的产品,包含建筑在投入使用前

的所有前期阶段过程中的全部活动。

物化阶段产生的环境排放主要包括：①建筑工程建造过程中所用材料在物化过程中的环境排放(包括开采、运输、工厂加工等环节)；②建筑工程施工过程产生的直接和间接的环境排放(包括建筑材料的运输、施工建造等过程)。

对于建筑来说，使用阶段可分为两类，公共建筑的使用阶段是建筑运营时的阶段，而住宅建筑的使用阶段即为居民在建筑中正常生活的阶段。

3.1.2 温室气体核算范围界定

由于不同温室气体的辐射特性不同，它们影响全球气候变暖的程度也会有所不同。目前，国际上通常以 CO₂ 为基准排放物，根据不同温室气体在一段时间内造成的全球变暖潜值，将其折为二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)等^[7]，本研究中将以温室气体中最典型的 CO₂ 作为研究对象。

3.1.3 物质能源系统边界

本研究中建筑物化阶段的物质系统边界为：建设过程中所需的各类建筑材料和辅助材料，以及由各种建材预制生产的建筑构件，如预制板、墙等；但各种材料生产设备、空调设备以及施工机械等，在其生产过程中产生的物质损耗和环境影响不包含在系统边界内。值得说明的是，通常碳排放按照直接排放、间接排放、供应链排放 3 部分分析，但本文是基于全生命周期的方法进行分析，因此在排放分类中是按照材料生产、施工建造以及运营阶段进行分析。

3.2 模型构建

本研究的建筑物化阶段，包含材料生产、运输和施工建造 3 部分，各阶段的 CO₂ 排放计算方法如下。

3.2.1 材料生产阶段

本阶段包含建筑工程各单位工程内所有分部分项工程中所需的全部建筑材料以及预制构件，从原材料开采与运输、材料生产到出厂运输的全部过程，部分材料在建筑生命周期内需要更换时，其更换所需材料在生产过程中的环境排放，也在此阶段考虑。期间的 CO₂ 排放通过各单元工序的材料消耗量与相应的材料 CO₂ 排放系数相乘而得，如式(1)：

$$E_{mat,C} = \sum_r \sum_q \sum_p \sum_n p_i \times (W/w) \times EF_{mat,i,C} \quad (1)$$

其中， $E_{mat,C}$ 为材料生产阶段的 CO₂ 排放量，kgCO₂eq； n 为单元工序； $EF_{mat,i,C}$ 为第 i 种材料的 CO₂ 排放系数。

3.2.2 运输阶段

本阶段包含建筑工程所需全部材料从工厂运输到施工现场的过程，期间的 CO₂ 排放由运输机械能源消耗产生。本阶段的 CO₂ 排放量计算公式如式(2)所示：

$$E_{tra,C} = \sum_r \sum_q \sum_p \sum_n p_i \times L_i \times EF_{tra,C} \quad (2)$$

其中， $E_{tra,C}$ 为运输阶段的 CO₂ 排放量，kgCO₂eq； $EF_{tra,C}$ 为运输的 CO₂ 排放系数。

建筑材料的主要运输方式为公路运输。取中国统计年鉴中公路货物运输平均运距为 176 km^[8]。根据李学东^[9]的研究，公路运输的燃油消耗量为 0.015 2 kg/t·km，则 $EF_{tra,j,C} = 0.055 6$ kgCO₂eq/(t·km)。所以，本阶段 CO₂ 排放量的计算公式可简化为式(3)：

$$E_{tra,C} = \sum_r \sum_q \sum_p \sum_n 10.1748 p_i \quad (3)$$

3.2.3 施工建造阶段

本阶段包含建筑工程在施工现场内所有耗能的过程，以及由于材料损耗产生的建筑垃圾的运输及处理过程，期间的 CO₂ 排放由施工机械、建筑垃圾运输处理和额外施工过程的能耗产生。具体计算公式如式(4)所示：

$$E_{con,C} = \sum_r \sum_q \sum_p \sum_n (q_j EF_{mach,j,C} + p_i \beta_i L_i EF_{tra,C} + p_i \beta_i EF_{dis,i,C}) + E_{conec} \quad (4)$$

其中， $E_{con,C}$ 为施工建造阶段的 CO₂ 排放量，kgCO₂eq； $EF_{mach,j,C}$ 为第 j 种机械的 CO₂ 排放系数，kgCO₂eq/台班； $EF_{dis,i,C}$ 为处理第 i 种材料产生垃圾的 CO₂ 排放系数； E_{conec} 为额外施工过程的 CO₂ 排放系数。

建筑垃圾运输过程排放的计算方法同运输阶段，处理过程的方式包括填埋、堆肥、焚烧，各处理方式的能耗和排放因子见表 1。

表 1 中国建筑垃圾处理能源消耗排放因子

Table 1 Energy consumption emission factors of construction waste treatment in China

处理方式	油耗/(kg/t)	电耗/(kWh/t)	燃油 CO ₂ 排放因子	电力 CO ₂ 排放因子	垃圾处理 CO ₂ 排放因子
填埋	0.23	1.26			2.17
堆肥	0.003 9	89.3	3.66	1.06	94.67
焚烧	0	794			841.64

综合上述 3 个阶段，建筑工程物化阶段的 CO₂ 排放总量如式(5)所示：

$$E_C = E_{mat,C} + E_{tra,C} + E_{con,C} \quad (5)$$

3.2.4 施工人员碳排放计算方法

现场施工人员主要分为工人与管理人员, 主要对其生活与办公区域所消耗的水、电、燃气与产生的生活垃圾进行计算。若在项目初期无统计数据时, 可根据各个房间设施的电器数量、功率进行估算。计算公式如式(6)所示:

$$E_H = E_E + E_W + E_L + E_G \quad (6)$$

其中, E_H 为施工人员碳排放, kgCO_2eq ; E_E 为人员消耗电碳排放, kgCO_2eq ; E_W 为人员消耗水碳排放, kgCO_2eq ; E_L 为人员消耗燃气碳排放, kgCO_2eq ; E_G 为人员产生生活垃圾处理碳排放, kgCO_2eq 。

人员消耗电、水、燃气与产生的生活垃圾处理碳排放计算公式如式(7)~(10)所示:

$$E_E = EF_E \times I \quad (7)$$

$$E_W = EF_W \times W \quad (8)$$

$$E_L = EF_L \times L \quad (9)$$

$$E_G = EF_G \times G \quad (10)$$

其中, EF_E 为电力排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{Kwh}$; I 为耗电量, kWh ; EF_W 为非工业农业用水排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$; W 为耗水量, kg ; EF_L 为燃气排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$; L 为燃气用量, m^3 ; EF_G 为生活垃圾处理排放因子, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$; G 为垃圾量, kg 。

本文所采用的材料排放因子主要以《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019)为依据, 标准中没有的材料, 其 CO_2 排放因子选用 GABI 软件中的数据库。化石能源使用过程中 CO_2 排放因子采用标准中选用的 IPCC 的数据。机械排放因子根据《全国统一施工机械台班费用定额》确定。

3.2.5 车站运行阶段碳排放计算方法

车站运行阶段碳排放主要来自通风空调系统、照明系统、自动扶梯系统的用电。

通风空调系统是指通风、空调等相关设备。其耗电量的计算^[10]如式(11)所示:

$$W = Y \times \eta \times T \quad (11)$$

式中: W 为车站通风空调系统能耗, kWh ; Y 为车站高峰小时热负荷, kW ; η 为设备功率系数; T 为设备运行时间, h 。

其中, Y 的计算如式(12)所示:

$$Y = c + a \times D \quad (12)$$

式中: D 为车站公共区域面积, m^2 ; c 、 a 为系数。由相关文献[11]可知, 对于南方城市屏蔽门车站, $c = -1\ 181.935$, $a = 0.516\ 3$; 对于南方城市闭式车站,

$c = 5.414\ 3$, $a = 0.0317\ 3$; 对于北方城市闭式车站, $c = 746.453\ 8$, $a = 0.132\ 9$ 。

车站一般采用节能灯具和智能控制系统。照明系统耗电量的计算如式(13)所示:

$$P = LPD \times D \times t \quad (13)$$

式中: LPD 为照明功率密度, W/m^2 ; D 为车站公共区域面积, m^2 ; t 为照明持续时间, h 。

自动扶梯系统的耗电量主要来自于发动机。计算公式^[21]如式(14)所示:

$$W = \sum_{i=0}^H Y_i \times h_i \quad (14)$$

式中: H 为设备运行时间, h ; Y_i 为运行功率(与运行时间和负载有关系); h_i 为以 Y_i 运行的运行时间, h 。

4 案例分析

4.1 工程概况

本文案例选用某大型轨道交通车站, 站房总规模 $11.4\ \text{万}\ \text{m}^2$, 建筑面积 $6.7\ \text{万}\ \text{m}^2$ 。站房为线上式构造, 由东西站房和高架站房组成, 分为出站层、站台层、高架层和局部夹层。站房建筑最高点 $37.45\ \text{m}$, 雨棚檐口高度 $5.50\ \text{m}$ 。

4.2 环境排放计算分析

本项目的总建筑面积为 $6.7\ \text{万}\ \text{m}^2$, 项目建造过程中使用的材料、机械与人工数量均是由该项目部提供的真实数据, 相关碳排放因子来源于《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019)。根据该站房的材料信息, 得到其总碳排因子为 $7.061 \times 10^7\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$, 其中, 材料碳排放为 $7.06 \times 10^7\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$, 机械能源碳排放为 $6.25 \times 10^3\ \text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 。材料碳排放和机械能源碳排放分别占总碳排放的 99% 和 1%。

在该站房建设中, 所用材料种类包括机械能源 440 种, 可计算碳排放种类 419 种, 即本项目碳排放计算中, 材料碳排放可计算率高达 95.23%。因此, 在碳排放分析结果中, 各类碳排放计算总和对项目碳排放分析说明的可靠性很高。

4.2.1 材料碳排放分析

依据材料碳排放计算方法和材料碳排放因子, 计算出该站房材料碳排放总和, 由于材料种类数目大, 本计算中只针对该项目中的主要材料(钢材、混凝土、铝材、木材、水泥、砌块、砂)进行分析。该站房主要材料碳排放结果见图 2, 各材料碳排放占比见图 3。

如图 2 所示, 在该站房建设阶段, 在所有材料用量中, 碳排放量从大到小依次为钢材、混凝土、铝材、

木材、水泥、砌块、砂。图 3 中，钢材的碳排放量为 $5.45 \times 10^7 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ，其总量占总材料碳排放的 50.84%，混凝土的碳排放量为 $3.05 \times 10^7 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ，占材料总碳排放的 28.46%，其余材料的碳排放总和不到 21%。而从钢材和混凝土的碳排放来看，钢材的碳排放几乎是混凝土的 2 倍，可见在站房的建设中钢材的使用占比非常大。这是因为，在该站房建设中，钢材的用量主要来源于主体结构中的钢梁、钢板、钢筋、钢檩条等。因此，在施工减排中，应着重考虑钢材和混凝土的使用量，合理规划，采用更节能环保的替代材料来减少碳排放。

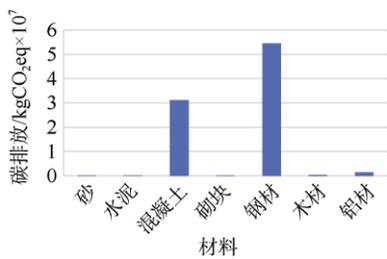


Figure 2 Carbon emissions of main materials

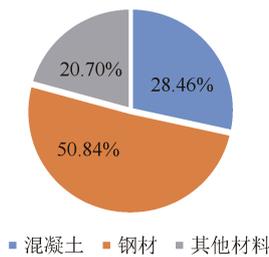


Figure 3 Proportions of carbon emissions of all studied materials

4.2.2 机械碳排放分析

依据机械能源碳排放计算方法和能源碳排放因子，计算出站房机械能源碳排放总和，在该项目建设中，机械能源主要来源于柴油和电。站房的机械碳排放结果见图 4。

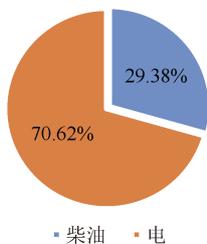


Figure 4 Carbon emissions from machinery

在该站房的机械能源碳排放中，柴油的碳排放量为 $1.84 \times 10^3 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ ，电的碳排放量为 $4.42 \times 10^7 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ 。由图 4 可看出，机械碳排放中柴油和电分别占总机械碳排放的 70.62% 和 29.38%。这说明，在站房项目中，使用柴油的机械用量居多，耗电的机械相对较少。而使用柴油的机械用量居多是因为在站房建设中，需要大型的吊装和运输设备，为获取较大动力，所消耗的柴油便增多。因此在减排措施中，该项目应着重考虑使用柴油较多的机械，通过高效的管理手段对该类机械的柴油消耗做控制。

4.2.3 人员碳排放分析

根据该站房工程项目部统计数据，该项目总人数为 680 人，建设项目工期总用电 $1\,123\,200 \text{ kWh}$ 、用水 $3.24 \times 10^7 \text{ kg}$ 、垃圾 $2.11 \times 10^6 \text{ kg}$ ，由于食堂使用电力加热设备，故没有燃气使用量。项目总人员碳排放为 $5.45 \times 10^6 \text{ kg}$ ，其中宿舍所占碳排放为 $5.17 \times 10^5 \text{ kg}$ ，食堂 $4.02 \times 10^5 \text{ kg}$ ，办公室 $2.75 \times 10^5 \text{ kg}$ ，垃圾处理 $4.26 \times 10^6 \text{ kg}$ 。

从图 5 可以看出，在宿舍、食堂、办公室和生活垃圾处理所产生的碳排放中，由于垃圾处理包含了垃圾的运输及处理，因此其碳排放所占比例最多，达到了 78%。

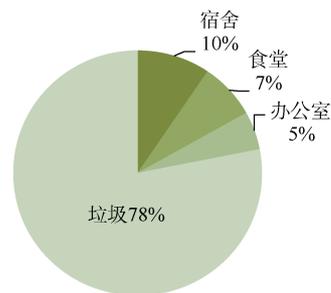


Figure 5 Proportions of individual carbon emission items

4.2.4 运行阶段碳排放分析

依据项目工程概况，公共区域面积有 6.7 万 m^2 。车站位于南方，属于闭式车站，参数 c 、 a 选择 5.414 3、0.031 73，晚高峰小时负荷为 $Y=2\,131.32$ ，假定通风空调系统每天平均工作 20 h，则车站通风空调系统每年耗电量为 $6\,223\,466.96 \text{ kWh}$ 。

根据车站的照明需求和规定，照明功率密度取 5 W/m^2 ，照明持续时间取 20 h，则照明系统每年耗电量为 $2\,445\,500 \text{ kWh}$ 。

考虑车站客流量和实际运行情况，自动扶梯的运

行速度为 0.75 m/s, 假设自动扶梯日平均负载为 50%, 此时运行功率为 12.07 kW。则自动扶梯系统的年耗电量为 4 229 170.32 kWh。

南方区域的加权平均电力碳排放因子为 0.9183 kgCO₂/(kW·h), 可得到各部分碳排放计算结果如表 2 所示。

表 2 车站能耗数据

Table 2 Station energy consumption data

系统	全年 能耗/kWh	单位面积全年 能耗/(kWh/m ²)	全年碳排放 /kgCO ₂	碳排放 占比/%
通风空调 系统	6 223 466.96	92.89	5.72×10 ⁶	48.2
照明系统	2 445 500	36.5	2.25×10 ⁶	19.0
自动扶梯 系统	4 229 170.32	63.12	3.88×10 ⁶	32.8
合计	1 289 8137.28	192.51	1.18×10 ⁷	100

4.3 节能减排措施

根据上述计算结果, 对于该类轨道交通车站的物化阶段及运营阶段碳排放, 可采取下列措施予以减少:

1) 优先选择节能机械。在成本和进度允许的情况下, 优先考虑更节能的施工机械。对于大型工程, 首选大型施工机械设备, 既能保证进度, 又能提高效率, 降低了单位工作量成本和能耗。

2) 推广工业化施工方式。工业化施工是指依据设计图纸, 在工厂内预制建筑构件及配件(如楼板、楼梯等), 达到一定强度后运到施工现场使用。工业化施工的规模化是实现节能、高效、优质、降低成本的关键。它既能减少模板、脚手架等周转材料的消耗, 又能减少能源的使用, 还能减少现场施工带来的灰尘、噪声、光、废水和固体废物对环境或人员的污染。

3) 加强可再生能源的使用。鼓励在项目现场使用太阳能照明、太阳能热水器、光伏发电等可再生能源; 鼓励建筑用水和建筑垃圾循环利用, 取得更好的节能减排效果。

4) 优化车站运营方式。在车站运营时采用智能能耗控制系统, 改造车站空调系统及自动扶梯系统, 最大限度减少不必要的能源消耗, 从而达到车站节能减排目的。

5 结论

本文基于 LCA 研究建筑物化阶段的 CO₂ 排放, 建立 CO₂ 排放计算模型, 并应用在实际案例中, 对其结果进行分析。本研究的主要成果如下:

1) 首先将土建工程按照分部工程、子分部工程、分项工程分解至单元工序层面, 采用目前世界先进的工程环境影响评价模型, 结合施工阶段、物化阶段和运营阶段的碳排放基础数据库, 建立单元工序的碳排放计算模型; 再采用集成的方法, 建立了建筑工程建设期和运营期的碳排放计算模型。

2) 对建立的模型进行案例分析, 对建筑物化阶段和运营阶段的碳排放进行了详细的计算与分析, 发现钢材的碳排放量占总材料碳排放的 50.84%, 混凝土的碳排放量占材料总碳排放的 28.46%; 机械碳排放中柴油和电分别占总机械碳排放的 70.62% 和 29.38%; 而在人员碳排放中垃圾处理产生的碳排放所占比例达到了 78%; 在车站运营阶段通风空调系统碳排放占比最大为 48.2%。

3) 对建筑工程物化阶段环境排放的研究, 分析影响建筑物化阶段各组成部分碳排放的主要因素的技术替代性, 以期对施工技术的改进提供参考。

参考文献

- [1] IPCC. Global Warming of 1.5°C[R]. 2018.
- [2] UN environment programme. 2021 global status report for buildings and construction: towards a zero-Emission, efficient and resilient buildings and construction sector[R]. 2021.
- [3] 林波荣, 刘念雄, 彭渤, 等. 国际建筑生命周期能耗和 CO₂ 排放比较研究[J]. 建筑科学, 2013(8): 22-27.
LING Borong, LIU Nianxiong, PENG Bo, et al. International comparative study on building life-cycle energy consumption and CO₂ emission[J]. Building science, 2013(8): 22-27.
- [4] HAES H, JOLLIET O, NORRIS G, et al. UNEP/SETAC life cycle initiative: background, aims and scope[J]. The international journal of life cycle assessment, 2002, 7(4): 192-195.
- [5] KÄGI T, DINKEL F, FRISCHKNECHT R, et al. Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?"—SETAC Europe 25th Annual Meeting, May 5th, 2015[J]. The international journal of life cycle assessment, 2016, 21(1): 129-132.
- [6] ISO 14044: Environmental management, life cycle assessment, requirements and guidelines[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.

(下转第 42 页)

除了上述策略之外,在今后的盖下空间人性化设计中,可以通过建立评价表的方式,周期性地对盖下空间的人性化设计进行动态评价,同时要加强与盖下工人的交流,最大限度满足工人对于盖下空间人性化设计的需求。工人的需求才是人性化设计立足的根本。除此以外,还应该将通过论证的新技术和新手段运用到车辆基地的建设中,采用智能控制设计,尤其是信息、网络和传感器技术,完善管理制度建设,加强人员培训,从而进一步提升车辆基地建设的现代化水平,保障轨道交通的运行安全。

参考文献

- [1] 袁锋. 城市轨道交通车辆段综合开发模式研究[J]. 铁道标准设计, 2013(1): 130-133.
- [2] TAO Ziyu, WANG Yimin, ZOU Chao, et al. Assessment of ventilation noise impact from metro depot with over-track platform structure on workers and nearby inhabitants[J]. Springer berlin heidelberg, 2019, 26(9).
- [3] YAN Lei, CHEN Zhou, ZOU Yunfeng, et al. Field study of the interior noise and vibration of a metro vehicle running on a viaduct: a case study in Guangzhou[J]. International journal of environmental research and public health, 2020, 17(8):
- [4] 张明. 地铁车辆段综合开发关键设计问题及应对措施研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(5): 88-93.
- [5] WANG Zhilei, GUO Xinxin, PAN Xuhai, et al. Numerical simulation of hybrid ventilation for underground subway depot with superstructures[J]. International journal of ventilation, 2020, 19(4):
- [6] 张娅薇, 宋佳, 李军, 徐轩轩. 轨交站点地区出行行为与空间环境适配性评价研究: 以武汉市居住型站点为例[J]. 城市问题, 2020(11): 23-35.
- [7] 张邦力. 物业开发地铁车辆段首层盖板高度影响因素分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(11): 155-159.
- [8] 王凯. 城市轨道交通车辆段上盖物业开发项目设计阶段的成本管控研究[J]. 建筑经济, 2016, 37(6): 54-57.
- [9] 赵金先, 蒋克洁, 武丹丹, 等. 基于 G1-CIM 模型的地铁项目融资风险评价研究[J]. 会计之友, 2019(14): 103-107.
- [10] 贾旭东, 衡量. 基于“扎根精神”的中国本土管理理论构建范式初探[J]. 管理学报, 2016, 13(3): 336-346.
- [11] 刘晓君, 高子倩, 付汉良. 城市居民再生水回用行为影响因素研究[J]. 城市问题, 2020(4): 83-89.
- [12] 晋铭铭, 罗迅. 马斯洛需求层次理论浅析[J]. 管理观察, 2019(16): 77-79.
- [13] 钟皓, 田青, 白敬伊. 基于社会认知理论的员工帮助行为对伦理型领导的作用机制研究[J]. 管理学报, 2019, 16(1): 64-71.

(编辑: 王艳菊)

(上接第 21 页)

- [7] 任志勇. 基于 LCA 的建筑能源系统碳排放核算研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
REN Zhiyong. Research of building energy system carbon emissions accounting base on LCA[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
National bureau of statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.
- [9] 李学东. 铁路与公路货物运输能耗的影响因素分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
LI Xuedong. Analysis on factors affected rail/road freight transportation energy consumption[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [10] 王慧文. 城市轨道交通车站能耗预测及定额标准研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
WANG Huiwen. Research on energy consumption prediction and quota standard of urban rail transit station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [11] 张燕燕. 城市轨道交通系统牵引及车站能耗研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
Zhang Yanyan. Study on the power consumption of traction and station of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.

(编辑: 王艳菊)