

# 半地下变电站建筑全生命周期碳排放与减碳策略研究\*

A Study on Lifecycle Carbon Emissions and Carbon Reduction Strategies of Semi-underground Substation Building

乔军<sup>1</sup>, 郝翠彩<sup>2</sup>, 刘少亮<sup>2</sup>, 张现<sup>3</sup>, 张玉龙<sup>2</sup>, 邢凯杰<sup>1</sup>

1. 河北电力工程监理有限公司, 河北 石家庄 050081;
2. 河北省建筑科学研究院有限公司, 河北 石家庄 050227;
3. 国网河北省电力有限公司建设公司, 河北 石家庄 050081)

**摘要:** 半地下变电站是城市能源供应体系中的重要设施。然而, 半地下变电站在建设和运营过程中会产生大量的碳排放, 对环境造成负面影响。因此, 本文对半地下变电站建筑全生命周期碳排放与减碳策略进行研究, 结果表明该建筑单位面积碳排放量为  $92.835 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , 其中, 运行阶段碳排放量占 83.90%。通过减碳策略, 在建材生产和运输阶段减碳量分别为 18%~34.3% 和 32.17%~91.14%。在建造拆除阶段, 通过拆除回收钢材可以回收钢材碳排放量的 37.85%~68.13%。绿植可以产生  $35.295 \text{ tCO}_2/\text{a}$  的碳汇量。光伏每年可以减少碳排放量为  $87.705 \text{ tCO}_2/\text{a}$ 。本文研究成果为进一步降低半地下变电站建筑的碳排放提供理论基础。

**关键词:** 半地下变电站; 碳排放; 减碳策略; 钢结构; 混凝土结构

中图分类号: TU201.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 05-0094-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.016

QIAO Jun<sup>1</sup>, HAO Cuicai<sup>2</sup>, LIU Shaoliang<sup>2</sup>, ZHANG Xian<sup>1</sup>, ZHANG Yulong<sup>2</sup>, XING Kaijie<sup>3</sup>

1. Hebei Electric Power Engineering Supervision Co., Ltd., Shijiazhuang 050081, China;
2. Institute of Intelligent and Green Building, Hebei Academy of Building Research Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China;
3. State Grid Hebei Electric Power Construction Company, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** Semi-underground substation buildings are important facilities in urban energy supply systems. However, significant carbon emissions are generated during construction and operation, negatively impacting the environment. The lifecycle carbon emissions and carbon reduction strategies of semi-underground substation building is studied in this paper. The results show that the carbon emissions per unit area of the building is  $92.835 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ , of which the carbon emission in the operation phase accounts for 83.90% of the total. The reduction of carbon through the carbon reduction strategy is 18%~34.3% and 32.17%~91.14% in the production and transportation phases of building materials, respectively. During the construction and demolition phase, 37.85%~68.13% of the carbon emissions of steel can be recovered by dismantling and recycling steel. The greenery can generate a carbon sink of approximately

\* 基金项目: 河北电力工程监理有限公司科技项目资助 (SGHEJL00LJJS2200014), 河北省重点研发计划 (22374501D), 河北省建设科技研究项目-河北省建筑碳排放核算与核查方法研究 (2022-2089)。

作者简介: 乔军 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 变电站建筑关键技术研究。

通信作者: 郝翠彩 (1969—), 女, 本科, 正高级工程师, 研究方向: 低/零碳建筑关键技术研究。

收稿日期: 2023-06-20

35.295 tCO<sub>2</sub>/a. Photovoltaics can reduce carbon emissions by approximately 87.705 tCO<sub>2</sub>/a. The findings of this paper provide a theoretical basis for further reducing carbon emissions from semi-underground substation buildings.

**Keywords:** semi-underground substation; carbon emissions; carbon reduction strategies; steel structure; concrete structure

## 0 引言

变电站是城市能源供应体系中的重要设施,它能够把高压电力传输到城市或建筑物中,并将其转换成低压电力以供使用。目前有众多学者对变电站各阶段进行研究。在设计阶段,卢敏等<sup>[1]</sup>通过模拟分析得到了不同室内散热密度条件下总耗热量指标随外墙传热系数的变化关系。黄进渊等<sup>[2]</sup>结合变电站建筑设计需要、自然条件及文化环境,总结出符合藏区自然条件和人文景观的现代藏区变电站建筑设计要素。在建设施工阶段,胡晨等<sup>[3]</sup>认为模块化装配式独立基础设计可以实现变电站基础的快速安装施工。李剑龙等<sup>[4]</sup>结合变电站建筑装配式安装模式和各类墙板的适用性和优缺点,最终推荐混凝土保温装饰一体板应用于变电站建筑。

在运营阶段,变电站建筑不仅要满足精密设备的运行要求,还要满足人员的工作使用要求。LIU 等<sup>[5]</sup>提出了一种新的通风优化方法,降低室内空气的平均温度。李令令等<sup>[6]</sup>通过分析变电站建筑在不同遮阳设施工况下建筑能耗和室内采光的变化,得到了低能耗情况下的最佳的遮阳设施尺寸。张圣金等<sup>[7]</sup>分析了变电站建筑节能性能,为严寒地区变电站建筑节能的整体设计方案提供依据。基于变电站建筑的设计建造和运行情况,熊天军等<sup>[8]</sup>认为通过主动式和被动式相结合的节能方式,最终实现近零能耗变电站建筑节能率 60% 的目标。

目前,已经对变电站建筑进行了大量的研究,包括建筑的设计、施工、运营等方面都进行了广泛的探究。然而,尽管对于建筑的碳排放问题越来越引起关注,但对于半地下变电站建筑的全生命周期碳排放和减碳策略研究却相对缺乏。实现半地下变电站建筑建设的低碳目标需要进行全生命周期的碳排放研究,并提出适当的减排策略,

这对于建筑行业和可持续发展都是至关重要的。因此,本文针对寒冷地区某半地下变电站建筑全生命周期碳排放和减碳策略进行研究,以更好地推动建筑的可持续发展。

## 1 全生命周期碳排放模型

### 1.1 碳排放计算边界与计算方法

变电站建筑全生命周期指的是从建筑材料生产到建筑拆除的全过程。根据 GB/T 51366-2019《建筑碳排放计算标准》的规定和项目实际情况,建筑碳排放计算边界可分为物化阶段、运行阶段和建造拆除阶段,各阶段计算边界如图 1 所示。

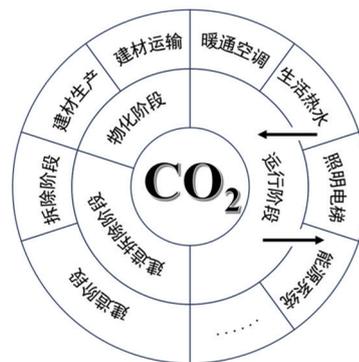


图 1 半地下变电站建筑碳排放计算边界

Fig. 1 Calculation boundary of carbon emission of semi-underground substation

基于 GB/T 51366-2019 的规定,建材生产与运输阶段碳排放量通过公式(1)计算。

$$C_{JC} = \sum_{i=1}^n M_i F_i + \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i \quad (1)$$

式中:  $C_{JC}$  为建材生产与运输阶段碳排放量, kgCO<sub>2</sub>;  $M_i$  为第  $i$  种主要建材的消耗量;  $F_i$  为第  $i$  种主要建材的碳排放因子, kgCO<sub>2</sub>/建材计量单位;  $D_i$  为第  $i$  种建材平均运输距离, km;  $T_i$  为第  $i$  种建材的运输方式下,单位质量运输距离的碳排放因子, kgCO<sub>2</sub>/(t·km)。

基于工程量清单,结合建筑施工图纸可以确定主要建材的消耗量。根据运输成本选择最佳的

建筑节能

运输距离和运输方式，运输方式采用中型汽油货车运输。混凝土及预拌砂浆运输距离为 40 km，其他材料运输距离为 300 km。

建筑建造阶段碳排放量通过公式 (2)(3) 计算。

$$C_{JZ} = Y \times A \quad (2)$$

$$Y = X + 1.99 \quad (3)$$

式中： $C_{JZ}$  为建筑建造阶段碳排放量， $\text{kgCO}_2$ ； $Y$  为单位面积的碳排放量， $\text{kgCO}_2/\text{m}^2$ ； $A$  为建筑面积， $\text{m}^2$ ； $X$  为建筑地上部分层数。

根据广东省《建筑碳排放计算导则（试行）》，建议粗略估算拆除阶段的碳排放，计算方法与建造阶段公式一致。

建筑运行阶段碳排放量通过公式 (4)(5) 计算。

$$C_{UM} = \left[ \sum_{i=1}^n (E_i \times EF_i) - C_p \right] \times y \quad (4)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (5)$$

式中： $C_{UM}$  为建筑运行阶段碳排放量， $\text{kgCO}_2$ ； $E_i$  为建筑第  $i$  类能源消耗量； $E_{i,j}$  为  $j$  类系统的第  $i$  类能源消耗量； $ER_{i,j}$  为  $j$  类系统消耗有可再生能源系统提供的第  $i$  类能源消耗量； $EF_i$  第  $i$  类能源的碳排放因子； $C_p$  为建筑绿地碳汇系统年减碳量， $\text{kgCO}_2/\text{a}$ ； $y$  为建筑设计寿命，50 年。

根据施工图纸及项目现场运行实际情况，可以确定变电站运行阶段的碳排放主要来源于电能，没有其他形式的能源消耗。因此，公式 (4)(5) 简化为公式 (6)。

$$C_M = E_e \times EF_e \times y \quad (6)$$

式中： $E_e$  为建筑用电消耗量， $\text{kWh/a}$ ； $EF_e$  为电力能源的碳排放因子， $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$ 。

1.2 建筑模型

该半地下变电站位于寒冷地区，建筑为地下 1 层，地上 2 层，局部 3 层。一层楼面及以下采用钢筋混凝土框架结构，一层楼面以上采用钢框架结构。建筑高度 17.9 m。总建筑面积 8402.6  $\text{m}^2$ ，地上总建筑面积 4982.6  $\text{m}^2$ ，如图 2 所示。

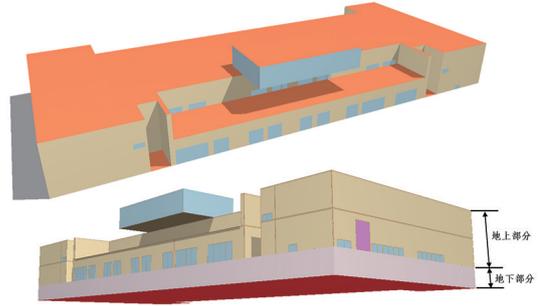


图 2 半地下变电站建筑碳建筑模型

Fig. 2 Carbon building model of semi-underground substation building

1.3 碳排放因子

根据变电站建筑工程量清单，建筑建设主要的建材包括混凝土、钢筋、预制板、水泥、砂浆、砂、砌块等 14 种主要的建材。在运输过程中，建设单位综合考虑运输成本及项目建设进度，选择采用中型汽油货车运输。基于文献得出主要建材碳排放因子及其运输碳排放因子，如表 1 所示。

表 1 主要建材碳排放因子及其运输碳排放因子

Table 1 Carbon emission factors of major building materials and transportation carbon emission factors

建材名称	单位	碳排放因子 <sup>[9-15]</sup>	
		生产阶段	运输阶段
混凝土	$\text{m}^3$	340	0.115
钢筋	t	2340	0.115
型钢	t	2365	0.115
钢混预制楼板	$\text{m}^3$	688	0.115
钢混预制墙板	$\text{m}^3$	488	0.115
水泥	t	735	0.115
预拌砂浆	t	370	0.115
砂	$\text{m}^3$	3	0.115
砌块	$\text{m}^3$	349	0.115
砖	$\text{m}^3$	336	0.115
外窗（平均）	$\text{m}^2$	129.5	0.115
保温门	$\text{m}^2$	48.3	0.115
陶瓷	$\text{m}^2$	19.5	0.115
涂料	t	6550	0.115
电缆	kg	94.1	0.115
管材	kg	3.6	0.115

研究对象运行阶段的能源消耗主要来自于电能，电网排放因子选择 2023 年 2 月生态环境部《关于做好 2023-2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》中发布的数据。2022 年度全国电网平均排放因子为 0.5703  $\text{tCO}_2/\text{MWh}$ 。

## 2 全生命周期碳排放计算结果与分析

### 2.1 变电站建筑碳排放分析

通过全生命周期碳排放模型计算得出变电站建筑全生命周期各个阶段碳排放量，如图 3 所示。通过对比分析各个阶段的碳排放量，可以直观的发现变电站全生命周期运行阶段的碳排放量最大，通过计算得出半地下变电站建筑全生命周期碳排放总量为 39002.880 tCO<sub>2</sub>，单位面积碳排放量为 92.835 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·a)。运行阶段碳排放量为 32724.299 tCO<sub>2</sub>，占全生命周期碳排放的 83.90%。建筑物化阶段（建材生产和运输阶段）的碳排放量为 6194.723 tCO<sub>2</sub>，占全生命周期碳排放的 15.88%。建筑建造和拆除阶段的碳排放量为 83.858 tCO<sub>2</sub>，占全生命周期碳排放的 0.22%。变电站物化阶段碳排放占比相对偏低，究其原因是在运行阶段变电站的主要能耗来源于风机的排风降温<sup>[16]</sup>。

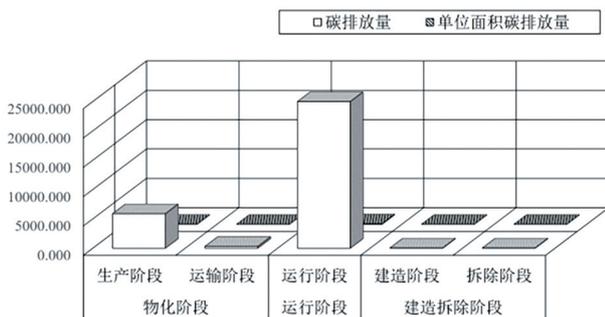


图 3 半地下变电站建筑全生命周期碳排放  
Fig. 3 Full life-cycle carbon emissions of semi-underground substation buildings

### 2.2 物化阶段碳排放分析

变电站建筑物化阶段包括建筑建材生产及其运输阶段。物化阶段主要建材的用量和碳排放量及其运输碳排放量如表 2 所示。通过表中数据可以发现混凝土和钢筋的用量和碳排放量最多，分别为 2058.676 tCO<sub>2</sub>和 1233.063 tCO<sub>2</sub>。其余材料的碳排放量与混凝土和钢筋相比不在一个数量级。对比分析表 2 中建材运输阶段碳排放量发现钢混预制墙板的运输碳排放最多，为 72.033 tCO<sub>2</sub>；其次为混凝土运输碳排放量 65.732 tCO<sub>2</sub>；再者是砂的运输碳排放量，为 49.943 tCO<sub>2</sub>。由此可以看出，

在物化阶段碳排放主要来源为混凝土、钢筋、钢混预制墙板、砂、砖等。

表 2 物化阶段主要建材碳排放量及其运输碳排放量  
Table 2 Carbon emissions of major building materials and transportation carbon emissions in the materialization stage

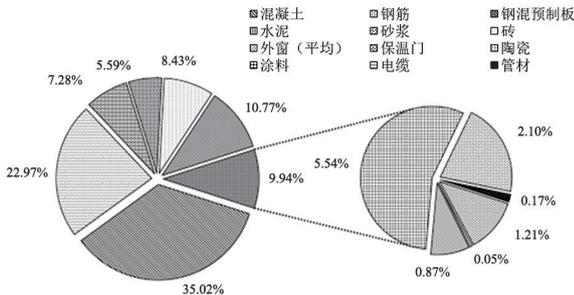
材料	重量 /t	碳排放量 /tCO <sub>2</sub>	
		生产阶段	运输阶段
混凝土	14289.600	2058.676	65.732
钢筋	526.950	1233.063	18.180
型钢	49.710	117.564	1.715
钢混预制楼板	74.570	20.523	2.573
钢混预制墙板	2087.910	407.558	72.033
水泥	447.410	328.846	15.436
预拌砂浆	1332.280	492.944	6.128
砂	1447.620	2.714	49.943
砌块	894.820	312.292	30.871
砖	1383.980	320.702	47.747
外窗	11.020	71.348	0.380
保温门	1.870	3.017	0.065
陶瓷	78.450	50.990	2.707
涂料	49.710	325.601	1.715
电缆	1.310	123.497	0.045
管材	2.780	10.022	0.096

为了进一步定量分析建筑建材生产阶段和运输阶段各种主要材料的占比，将同种类型的建材进行合并，得到如图 4 所示的物化阶段主要建材及其运输的碳排放占比图。由图 4 (a) 数据可知，在建材生产阶段，混凝土的碳排放占比最大，为 35.02%；其次为钢筋（包括钢筋和型钢），占比为 22.97%；再次是砖（包括砖和砌块）碳排放，占比为 10.77%；然后是砂浆（砂和预拌砂浆）的碳排放量，占比为 8.43%；钢混预制板（钢混预制墙板和钢混预制楼板）和水泥碳排放占比分别为 7.2%和 5.59%。其余各类建材所产生的碳排放量占比之和为 9.94%。结合建材用量和碳排放因子分析可以发现，钢筋的碳排放占比大主要是因为材料的排放因子大。而对于混凝土、砖、砂浆等虽然碳排放因子在 3-370 之间，但是建材用量的影响权重更大。由图 4 (b) 数据可知，在建材运输阶段，碳排放量占比由大及小依次为砖（24.93%）、钢混预制板（23.66%）、混凝土（20.84%）、砂浆（17.7%）、钢筋（6.31%）、水泥（4.89%）。其余建材运输碳排放总量为 1.59%。结合建材重量和运输距离分析可以发现，钢混预制板的排放量比混凝土和砂浆高的原因除

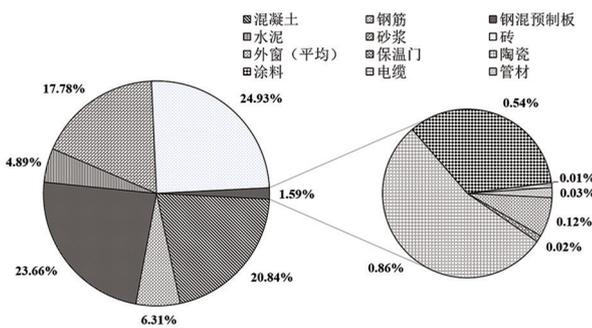
建筑节能

了重量大以外，更加重要的原因是运输距离短。

因此，在建材生产阶段，对于用量较大的建筑材料，选择具备低碳特性的产品将有效降低建材生产阶段的碳排放量。在保证建材质量的提前下，坚持就近原则，选择性价比的运输方式同样对降低建材运输阶段碳排放至关重要。



(b) 生产阶段主要建材碳排放占比



(b) 运输阶段主要建材碳排放占比

图 4 物化阶段主要建材及其运输的碳排放占比

Fig. 4 Carbon emission share of major building materials and transportation in the materialization stage

2.3 运行阶段碳排放分析

基于变电站建筑全生命周期碳排放模型可知变电站建筑运行阶段的碳排放来源主要来自于电能，主要涉及建筑供冷、供暖、照明、风机设备。在运行阶段建筑碳排放量为 32724.299 tCO<sub>2</sub>，单位面积碳排放量为 77.891 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·a)。各分项能耗及碳排放量如表 3 所示。值得一提的是，

表 3 运行阶段碳排放

Table 3 Carbon emissions during operation phase

类别	碳排放量/tCO <sub>2</sub>	占比/%
供冷	1500.424	4.59
供暖	305.251	0.93
照明	1576.952	4.82
设备风机	29341.673	89.66

变电站的风机所产生的碳排放量最大，占运行阶

段总碳排放量的 89.66%。这是由于在变电站内主变室、配电室、电抗器室、电容器室、电缆层等房间的设备产生大量的余热，需要风机进行排风散热，从而保证室内温度维持在 40℃ 以下。

3 半地下变电站建筑减碳策略

3.1 物化阶段减碳策略

虽然该半地下变电站建筑物物化阶段碳排放占建筑全生命周期 8.92%，排放权重远远小于建筑运行阶段，但是物化阶段的碳排放相对集中，对环境的短期影响显著，并且对建筑产业链及其他行业节能减排也有着深远的影响<sup>[17]</sup>。在建筑建材生产阶段可以通过提高工业化和装配化降低建材碳排放量。结合表 1 和表 2 数据可以发现，预制构建比现场施工建造碳排放量少，具有较大节碳潜力。与现浇钢筋混凝土相比，装配式钢结构预制件的减碳量可以达到 18%~34.3%。在建材运输阶段，目前该项目均采用中型汽油货车运输，以此为基准，与其他形式的运输方式排放量对比，如表 4 所示。与中型汽油货车运输相比，采用重型柴油货车可以降低碳排放量 32.17%~50.43%。如果采用铁路运输，则减碳率可以达到 91.14%。

表 4 与基准运输方式相比不同类型运输方式减碳量

Table 4 Carbon reduction for different types of transport compared to the baseline transport mode

运输方式	排放量/tCO <sub>2</sub>	减碳率/%
重型汽油货车 (载重 10 t-18 t)	285.2	9.57
重型柴油货车 (载重 30 t)	213.9	32.17
重型柴油货车 (载重 46 t)	156.312	50.43
铁路运输	27.423	91.14

3.2 钢材回收减碳策略

半地下变电站建筑一层楼面及以下采用钢筋混凝土框架结构，一层楼面以上采用钢框架结构。在建筑拆除阶段变电站部分钢梁和钢柱构件经过处理加工后可进行二次利用。具体钢材回收减碳量可以通过公式 (7) 计算得到。

$$C_{HS} = 0.001 M_g \alpha \beta F_g \quad (7)$$

式中:  $C_{HS}$  为建筑钢材回收减碳量, tCO<sub>2</sub>;  $M_g$  为钢材总量, t;  $\alpha$  为钢材回收比例;  $\beta$  为二次加工折减率, 90%;  $F_g$  为回收钢碳排放因子, 取 1970 kgCO<sub>2</sub>/t<sup>[16]</sup>。

该半地下变电站建筑钢材用量为 576.66 t (钢

筋和型钢), 不考虑建筑钢筋混凝土框架结构中使用的钢材, 根据公式 (7) 可以计算得到钢材回收减碳量, 如表 5 所示。钢筋和型钢在生产阶段的碳排放量为 1350.627 tCO<sub>2</sub>, 当钢材回收比例达到 50% 时, 减碳量为算出钢材回收减碳率 37.85%。当钢材回收比例达到 90% 时, 减碳量为算出钢材回收减碳率 68.13%。

表 5 回收钢材的减碳量  
Table 5 Carbon reduction of recycled steel

回收比例/%	减碳量/tCO <sub>2</sub>	单位面积减碳量/kgCO <sub>2</sub>
50	511.209	162.216
70	715.693	227.103
90	920.176	291.990

### 3.3 绿植碳汇策略

该半地下变电站建筑地上部分面积种植黑松、龙柏、黄杨等乔木, 蓝花鼠尾草、胡颓子、紫叶小檗等灌木, 以及各种多年或一年生的花草植物, 总面积达到了 4061.7 m<sup>2</sup>。根据广东省《建筑碳排放计算导则(试行)》可知不同绿植的碳汇因子, 如表 6 所示。当考虑绿植生长因子修正(0.7)的情况下<sup>[20]</sup>, 通过计算得出 50 年绿植碳固定量为 1764.750 tCO<sub>2</sub>, 年均固碳量为 35.295 tCO<sub>2</sub>/a。

表 6 半地下变电站规划面积内绿植碳汇量  
Table 6 Carbon sink of greenery in the planned area of semi-underground substation

绿植	碳汇因子/(kg/m <sup>2</sup> ·a)	面积/m <sup>2</sup>	固定总量/tCO <sub>2</sub>
A 类	27.5	297.5	286.344
B 类	22.5	88.5	69.694
C 类	10.96	3675.7	1408.712

注: A 类: 大小乔木、灌木、花草密植混种区(乔木平均种植间距<3.0 m, 土壤深度>1.0 m)。B 类: 大小乔木密植混种区(平均种植间距<3.0 m, 土壤深度>0.9 m)。C 类: 密植灌木丛(高约 0.9, 土壤密度>0.5 m)。

### 4 光伏碳中和方案

根据项目现场情况, 初步勘察光伏系统安装在屋顶, 光伏面积约为 600 m<sup>2</sup>。该屋面具备较好的安装条件, 能保证光伏组件方位角和倾斜度均匀, 组件之间不相互遮挡, 组件背面可以通风散热。基于全年可接收的辐照量, 最佳安装角度为 34°, 倾斜面年总辐射量近似取 1610.9 kWh/m<sup>2</sup>。光伏系统年发电量通过公式 (8) 可以计算得到。

$$L = Q \times S \times \varphi_1 \times \varphi_2 \quad (8)$$

式中:  $L$  为光伏系统年发电量, kWh;  $Q$  为倾斜面年总辐射量, kWh/m<sup>2</sup>;  $S$  为光伏组件面积, m<sup>2</sup>;  $\varphi_1$  为

光伏组件转化效率, %;  $\varphi_2$  为光伏系统实际发电效率, %。

光伏组件转化效率取 21.3%。在实际发电过程中, 光伏组件输出功率需要考虑 0.95 的影响系数<sup>[21]</sup>。随着光伏组件温度的升高, 光伏组件的输出功率也会受到影响, 考虑 0.89 的影响系数<sup>[22]</sup>。光伏组件表面灰尘的累积, 会影响辐射到电池板表面的太阳辐射强度, 同样会影响太阳电池板的输出功率<sup>[23]</sup>。在分析太阳电池板输出功率时要考虑到 0.93 的影响系数<sup>[22, 24]</sup>。另外, 受光伏组件的不匹配性和板间连线损失等影响, 需要考虑 0.95 的影响系数<sup>[22, 25]</sup>。因此, 光伏系统实际发电效率约 74.7%。基于公式计算, 光伏系统实际年发电量为 153786.99 kWh。减少碳排放量为 87.705 tCO<sub>2</sub>。

### 5 结论

本文选取了寒冷地区半地下变电站建筑作为研究对象, 对其全生命周期碳排放量和减碳策略进行了计算分析研究, 以期为我国变电站建筑低碳化规划、设计评价提供借鉴和参考。基于本文的研究可以得出以下主要结论:

(1) 在不考虑全生命周期的减碳策略的情况下, 该半地下变电站建筑全生命周期碳排放量为 39002.880 tCO<sub>2</sub>, 单位面积碳排放量为 92.835 kgCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·a), 其中, 物化阶段碳排放量占 15.88%, 运行阶段碳排放量占 83.90%, 建造拆除阶段碳排放量占 0.22%。

(2) 通过半地下变电站建筑全生命周期的减碳策略可以指导建筑向低碳目标发展。其中在建材生产阶段, 通过推行高装配化、工业化可以降低 18%–34.3% 的碳排放量。运输阶段通过优化运输方式可以降低 32.17%–91.14% 的碳排放量。在建造拆除阶段, 通过拆除回收钢材可以回收钢材碳排放量的 37.85%–68.13%。

(3) 通过在建筑屋面及用地红线内种植绿植, 大约可以产生 35.295 tCO<sub>2</sub>/a 的碳汇量。根据项目现场情况, 光伏每年发电量为 153786.99 kWh。全部用于建筑, 每年可以减少碳排放量为 87.705 tCO<sub>2</sub>。

## 建筑节能

## 参 考 文 献

- [1] 卢敏, 王军, 陈军, 等. 变电站室内散热密度对围护结构节能性的影响 [J]. 建筑节能, 2017, 45 (10): 128-31.
- [2] 黄进渊, 廖验. 浅谈藏区变电站建筑设计——以阿里联网工程霍尔 220 kV 变电站为例 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2021, 54 (S01).
- [3] 胡晨, 薛次, 胡子明, 等. 变电站建筑物模块化装配式基础设计与数值分析 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2022, 45 (3).
- [4] 李龙剑, 何毅, 陆启亮. 绿色装配式变电站墙板选择 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2020, 53 (S01).
- [5] LIU Y, YE W, LI Y, et al. Ventilation optimization for reduction of indoor air temperature of main transformer room in urban indoor substation by the variational method [J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28 (5): 1089-101.
- [6] 李令令, 孟庆林, 张磊, 等. 夏热冬暖地区变电站建筑外遮阳的双目标优化 [J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40 (2).
- [7] 张圣金, 张静波, 杜海滨. 严寒地区变电站建筑节能测试 [J]. 黑龙江科学, 2014, 5 (11): 70-1.
- [8] 熊天军, 李国鹏, 刘焯, 等. 近零能耗变电站建筑实现途径研究 [J]. 建筑节能 (中英文), 2021, 49 (12): 39-44.
- [9] 李岳岩, 陈静. 建筑全生命周期的碳足迹 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [10] LIU Z, XU W, ZHAI X, et al. Feasibility and performance study of the hybrid ground-source heat pump system for one office building in Chinese heating dominated areas [J]. Renewable Energy, 2017, 101: 1131-40.
- [11] 吴淑艺. 基于工程量清单的建筑工程碳排放研究 [D]; 福州: 福建农林大学, 2017.
- [12] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究 [D]; 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [13] 周越. 浙江省建筑外墙保温体系物化过程 CO2 排放研究 [D]; 杭州: 浙江大学, 2017.
- [14] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究 [D]; 南京: 东南大学, 2015.
- [15] 高宇, 李政道, 张慧, 等. 基于 LCA 的装配式建筑建造全过程的碳排放分析 [J]. 工程管理学报, 2018, 32 (2): 30-4.
- [16] 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): 275-82.
- [17] 李岳岩, 张凯, 李金潞. 居住建筑全生命周期碳排放对比分析与减碳策略 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2021, 53 (5): 737-45.
- [18] 宋志茜, 罗晓予, 葛坚. 钢结构装配式住宅物化阶段碳排放研究 [J]. 建筑技术, 2023, 54 (2): 158-62.
- [19] 宝塔娜. 装配式技术对建筑物化阶段碳排放的影响研究 [D]; 西安: 长安大学, 2020.
- [20] 朱凯, 张倩倩, 武鹏飞, 等. 城市绿地碳汇核算方法及其研究进展 [J]. 陕西林业科技, 2015, (4): 34-9.
- [21] 孟陈. 太阳能光伏并网发电系统的应用实践 [J]. 安徽建筑, 2016, 23 (5): 255-6.
- [22] 张鸣, 蔡亮, 虞维平. BIPV 系统经济性分析 [J]. 应用能源技术, 2007, (11): 1-4.
- [23] 赵伟萍, 吕玉坤, 阎维平. 污秽颗粒在太阳能光伏组件表面的沉积机理及组件积灰特性数值模拟 [J]. 动力工程学报, 2022, 42 (4): 11.
- [24] 梁文菁, 陈进. 浅析光伏屋顶效益及发展所面临的问题与对策 [J]. 绿色科技, 2012, (7): 237-9.
- [25] 叶明. 海岛居民供电问题及解决应用 [J]. 浙江农业科学, 2021, 62 (4): 840-2.

杂志社网址: <http://fmhzhly.com/>