

## 一种考虑碳排放费用的冷热源配置方法

蒋顾局<sup>1</sup>, 易柯<sup>2</sup>, 郑进福<sup>1,\*</sup>, 赵维豪<sup>1</sup>, 陈诗文<sup>2</sup>, 胡松涛<sup>1</sup>, 申寿恒<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 中车株洲电力机车有限公司, 株洲 412000)

**摘要:** 2020 年中国建筑运行阶段碳排放量约占全国碳排放总量的 21.7%, 具有巨大的减碳潜力。但是, 目前选取冷热源方案时, 很少考虑碳排放费用对冷热源方案经济性的影响。提出考虑碳排放费用的冷热源配置方法, 建立包含冷热源方案初投资、运行与维护费用以及碳排放费用的全生命周期成本(LCC)数学模型, 以确定具有经济性优势的冷热源方案。案例结果表明: 碳排放费用对冷热源方案的全生命周期成本具有不可忽视的影响, 原本具有经济性优势的方案在考虑碳排放费用后可能将失去经济性优势。所以, 提出的考虑碳排放费用的冷热源配置方法更符合实际冷热源配置应用。

**关键词:** 冷热源方案; 碳排放费用; 全生命周期成本; 初投资; 运行费用

**中图分类号:** TU995.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2024)06-0081-07

## A method for configuring cold and heat sources considering carbon emission costs

JIANG Guju<sup>1</sup>, YI Ke<sup>2</sup>, ZHENG Jinfu<sup>1,\*</sup>, ZHAO Weihao<sup>1</sup>,  
CHEN Shiwen<sup>2</sup>, HU Songtao<sup>1</sup>, SHEN Shouheng<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co. Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**Abstract:** In 2020, carbon emissions of the building operation phase in China accounted for about 21.7% of the country's total carbon emissions, with huge potential for carbon reduction. However, the impact of carbon emission costs on the economy of cold and heat source schemes is seldom considered in the current selection of cold and heat source schemes. This paper proposes a method to configurate cold and heat sources which considers carbon emission costs. A life cycle cost (LCC) mathematical model is established that includes the initial investment, operation and maintenance costs and carbon emission costs to finalize the cold and heat source scheme with economic advantages. The result shows that the carbon emission costs have a non-negligible impact on the LCC of the cold and heat source scheme. The scheme may lose its economic advantage after the carbon emission costs are considered. Therefore, the proposed method for configuring cold and heat sources which considers carbon emission costs is more applicable to the actual configuration of cold and heat sources.

**收稿日期:** 2023-11-25

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52308097); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QE178)

**作者简介:** 蒋顾局(1999—), 男, 浙江嘉兴人。硕士, 研究方向为供热系统柔性储能。E-mail: 571037581@qq.com。

\* **通信作者:** 郑进福(1991—), 男, 福建泉州人。博士, 副教授, 主要从事人工环境营造与可再生能源利用等方面的研究。  
E-mail: zjf1102610317@163.com。

**Key words:** cold and heat source schemes; carbon emission cost; life cycle cost(LCC); initial investment; operation cost

2020年中国建筑运行阶段碳排放量为21.6亿t,占全国碳排放总量的21.7%<sup>[1]</sup>,合理选取冷热源方案能有效降低建筑运行阶段碳排放量。全生命周期成本(LCC)最早于20世纪60年代由美国军方在调查军事技术装备系统维持费后提出<sup>[2]</sup>。龙惟定<sup>[3]</sup>将全生命周期成本引入暖通空调领域,提出在暖通空调设计中,不应只考虑系统初投资,而应将运行和管理费用考虑在内,计算全生命周期成本。目前,对冷热源方案进行经济性分析时,主要利用全生命周期成本对冷热源选型。

罗志冬等<sup>[4]</sup>通过模拟得到3种不同冷热源方案的初投资、运行费用,通过计算全生命周期成本得到最佳冷热源方案。不同的建筑维护结构所对应的最佳冷热源系统方案不同,通过计算全生命周期成本可以匹配建筑维护结构与最佳冷热源方案<sup>[5]</sup>。目前,全生命周期成本评价法已经得到广泛运用。张晓霞等<sup>[6]</sup>在经济性分析的基础上考虑了节能效益,优化冷热源方案。王勇等<sup>[7]</sup>将废弃处理成本纳入全生命周期成本。

将碳排放费用纳入全生命周期成本范畴,首先需要得到碳排放量。生命周期评价(LCA)自1985年被应用于温室气体计算,经过不断地发展,成为了建筑碳排放评价和建筑碳排放量计算的核心理论<sup>[8]</sup>。

一般住宅<sup>[9]</sup>及办公建筑<sup>[10]</sup>在生命周期评价中,运行阶段CO<sub>2</sub>当量排放量占比最大。SUZUKI等<sup>[11]</sup>基于生命周期理念,将生命周期划分为施工、运营、维护和改造4个阶段,获得建筑生命周期的能源消耗和CO<sub>2</sub>排放量。胡玉坤等<sup>[12]</sup>将生命周期理论运用于冷热源方案碳排放计算,通过温度频率法建立了囊括冷热源系统各个阶段的碳排放模型,为计算冷热源系统碳排放提供了理论依据。

杨海龙<sup>[13]</sup>从碳排放的角度出发,以单位热值碳排放强度计算不同形式的冷热源方案的碳排放量。不同的冷热源系统,碳排放量差异较大,采用直燃型溴化锂冷热水机组的方案相较于变频离心式冷水机组加地源热泵机组的方案,年碳排放量约高出77%。热泵系统作为冷源、热源使用时,碳排放优势较为明显<sup>[14]</sup>。胡成亚等<sup>[15]</sup>通过生命周期碳排放分析发现,直燃型冷热源形式的碳排放量约为江水源热泵与空气源热泵的3~4倍。

目前,对冷热源系统各阶段产生的碳排放量已经有较为成熟的计算方法。但是,在对冷热源方案进行经济性分析时,很少有研究将碳排放费用考虑在内,从而可能会选取实际成本更高的冷热源方案,还可能导致温室气体的大量排放,对环境造成危害,不利于“双碳”目标的达成。

针对以上问题,本文提出了一种考虑碳排放费用的冷热源配置方法。该方法对冷热源方案初投资、运行与维护费用以及碳排放费用的全生命周期成本进行分析,并且充分考虑利率以及通货膨胀率所带来的影响。

## 1 全生命周期成本数学模型建立

本文通过全生命周期成本对冷热源方案进行比较。全生命周期成本是指设备或系统从诞生到报废的整个期间需要的费用总和<sup>[7]</sup>。根据不同的方案,可采用的全生命周期成本估算方法有参数法、类比法、工程法和专家法4种<sup>[16]</sup>。各估算方法中最大的问题是建立费用估计关系式,其次是获取费用估算式中的各项参数<sup>[17]</sup>。由于各项参数难以全部获得,因此,需要对全生命周期成本评价进行以下简化<sup>[17]</sup>:

1) 允许不考虑共同拥有的费用。全生命周期成本评价的目的在于通过比较各方案间全生命周期成本的差异,选取最优方案,而非完整计算所有费用。

2) 分析的重点是显著影响全生命周期成本的因素。本文提出的全生命周期成本数学模型由初投资、运行与维护费用以及碳排放费用构成,结合利率以及通货膨胀率的变化得到,见式(1)。

$$C_{LCC} = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

式中: $C_{LCC}$ 为全生命周期成本,元; $C_t$ 为冷热源系统运行第 $t$ 年的费用,元; $C_0$ 为冷热源方案的初投资,元; $n$ 为冷热源的生命期, $a$ ; $i$ 为基准折现率。

### 1.1 初投资

式(1)中,初投资是指冷热源方案中设备采购、施工安装等在系统运行前所需的一切成本之和<sup>[7]</sup>。初投资主要包含设备费、配电费、安装费、打孔费等。由于不同冷热源机组费用差别大且施工安装难度不一,不同方案的初投资可达数倍之差。因此,初投资对全生命周期成本有较大影响。设备费是指购买冷热源方案中各设备所耗费用。配电费是指电网公司为用户提供将电从电厂传输至用户的输配电服务而收取的费用。安装费是指安装冷热源方案各设备所耗费用,考虑系统的复杂程度,取设备费用的一定比例。打孔费是指考虑土壤源热泵时,需要计算地埋管打孔回填所耗费用。初投资的计算见式(2)。

$$C_0 = C_{\text{equ}} + C_{\text{dis}} + C_{\text{ins}} + C_{\text{pun}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{equ}}$  为设备费,元; $C_{\text{dis}}$  为配电费,元; $C_{\text{ins}}$  为安装费,元; $C_{\text{pun}}$  为打孔费,元。

其中配电费具体计算见式(3)。

$$C_{\text{dis}} = P \times C_a \times a \quad (3)$$

式中: $C_0$  为配电费,元; $P$  为所有设备额定功率之和,kW; $C_a$  为安装配电设施费用,元/kW; $a$  为功率系数,取 0.85。

### 1.2 运行与维护费用

式(1)中第  $t$  年费用是指冷热源方案每年运行产生的费用,包含运行与维护费用和碳排放费用。运行与维护费用包括运行费用及维护费用两部分,见式(4)。设备运行费用是指冷热源系统运行时,消耗能源所产生的费用,其值等于年能源消耗量乘以该能源单价。运行费用通常在全生命周期成本中占比最大,可达初投资的数倍。不同冷热源机组能效比不同、能源消耗种类不同,运行费用差异大。因此,运行费用是影响全生命周期成本最主要的因素。运行费用中的电费与蒸汽费计算见式(5)与式(6)。维护费用是指保证各设备正常运行所产生的费用,按照初投资的一定百分比进行计算,由于各方案相差较小,对结果影响可忽略,不予考虑。

$$C_{f,t} = C_{y,t} + C_{w,t} \quad (4)$$

式中: $C_{f,t}$  为第  $t$  年的运行与维护费用,元; $C_{y,t}$  为第  $t$  年的运行费用,元; $C_{w,t}$  为第  $t$  年的维护费用,元。

$$C_e = P \times I \times T \times Q \times C_b \quad (5)$$

$$C_s = M \times I \times T \times Q \times C_d \quad (6)$$

式中: $C_e$  为运行冷热源方案的电费,元; $P$  为所有设备额定功率之和,kW; $I$  为建筑的负荷区间,%; $T$  为空调季运行时间,h; $Q$  为负荷频率,%; $C_b$  为电费单价,元/(kW·h); $C_s$  为运行冷热源方案的蒸汽费,元; $M$  为蒸汽耗量,t/h; $C_d$  为蒸汽单价,元/t。

### 1.3 碳排放费用

碳排放费用是指运行冷热源方案直接或间接排放  $\text{CO}_2$  所产生的费用,在进行经济性分析时,需要将碳排放费用考虑在内。碳排放费用由运行冷热源方案消耗能源折合标准煤燃烧得出  $\text{CO}_2$  排放量,根据实时碳价得出结果,见式(7)。不同冷热源方案碳排放费用的差异主要体现在能源消耗量、能源折算标准煤参考系数两方面。

$$C_c = M_c \times m \times c_c \quad (7)$$

式中: $C_c$  为碳排放费用,元; $M_c$  为折合标准煤质量,t; $m$  为每吨标准煤释放的  $\text{CO}_2$  质量,kg/kg; $c_c$  为实时碳价,元/t。

根据《中国能源统计年鉴 2020》<sup>[18]</sup>,选取以及估算适当的能源折算标准煤参考系数,如表 1 所示。

表 1 主要能源折标准煤参考系数

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数
天然气	32 238~38 931 kJ/m <sup>3</sup>	1.1000~1.3300 kg/m <sup>3</sup>
蒸汽(2 MPa)	3 696 kJ/kg	0.126 143 kg/kg
电力(当量)	3 600 kJ/(kW·h)	0.122 9 kg/(kW·h)

## 2 具体案例分析

### 2.1 建筑概况

以湖南省常德市某医院为例,医院总用地面积 146 017.5 m<sup>2</sup>,绿地面积 56 946.8 m<sup>2</sup>,总建筑面积 217 276.5 m<sup>2</sup>,地下 2 层,地上 19 层。全院总冷负荷为 16 557.72 kW,总热负荷为 10 818.53 kW,夏季供冷时长 2 448 h,冬季供暖时长 3 000 h。全年负荷频率见表 2。

### 2.2 方案选取

#### 2.2.1 既有能源资源分析

对冷热源方案的选取应当考虑项目周边具体的能源以及资源情况。通过分析周边容易获得的能源资源,选取合适的冷热源方案。本案例周边易获得的能源资源主要有以下 3 种:

1) 工业余热。案例周边有 2.0 MPa 的蒸汽供给,价格为 165 元/t,是可以利用的工业余热,能够满足建筑供暖和制备生活热水的需求。根据《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)<sup>[19]</sup>,有可供利用的废热或工业余热的区域,热源宜采用废热或工业余热。

2) 地质条件。案例周边地层以第四系(新生代第四纪松散堆积物)为主,厚度一般为 35~60 m,最厚达 110 m。松散层的导热系数为 1.50 W/(m·K),热扩散率最小为 0.82×10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s,项目周边的大地热流值为 50~60 MW/m<sup>2</sup>,和中国平均值相近,土壤源热泵的实际运行效率较高。

3) 电力条件。项目所在城市具备市政电网,城市电力价格为 0.67 元/(kW·h),无峰谷电价差。

根据以上能源及资源条件,可选的冷热源形式有:蒸汽型吸收式冷水机组、汽-水板式换热机组、水冷式冷水机组及土壤源热泵。

#### 2.2.2 具体方案

根据项目周边的能源禀赋,对以下两种可行的冷热源方案进行比较,计算是否考虑碳排放费用的全生命周期成本,分析碳排放费用对冷热源方案经济性的影响。方案 1 为土壤源热泵+蒸汽型吸收式冷水机组;方案 2 为汽-水板式换热机组+水冷式冷水机组。方案 1、方案 2 具体设备选型分别见表 3、表 4。

表 2 全年负荷频率

负荷区间/%	负荷频率/%	
	冷负荷	热负荷
[0,10)	23.2	2.1
[10,20)	20.8	5.0
[20,30)	14.7	18.1
[30,40)	11.8	26.1
[40,50)	8.7	15.0
[50,60)	10.0	12.8
[60,70)	5.9	11.4
[70,80)	3.5	6.8
[80,90)	1.0	2.2
[90,100)	0.3	0.4

表 3 方案 1 设备选型

名称	规格	能耗	个数/台	总价/万元
土壤源热泵	制冷量:3 356.8 kW 制热量:3 348.0 kW	制冷功率:481.9 kW 制热功率:678.4 kW	4	1 074.20
地理管循环泵	流量:607 m <sup>3</sup> /h; 扬程:35.5 m	功率:90.0 kW	4	14.57
蒸汽型吸收式冷水机组	制冷量:3 490.0 kW	功率:7.7 kW; 蒸汽耗量:5.2 t/h	1	279.20
综合水处理器	流量:50 m <sup>3</sup> /h	功率:0.1 kW	1	0.42
冷却塔	流量:900 m <sup>3</sup> /h	功率:30.0 kW	1	27.00
冷冻水泵	流量:610 m <sup>3</sup> /h; 扬程:23.0 m	功率:55.0 kW	1	3.66
冷却水泵	流量:900 m <sup>3</sup> /h; 扬程:31.0 m	功率:110.0 kW	1	5.40
总计				1 404.45

表 4 方案 2 设备选型

名称	规格	能耗	个数/台	总价/万元
汽-水板式空调换热机组	制热量:11 200 kW	功率:180.0 kW; 蒸汽耗量:16.7 t/h	1	11.20
离心式水冷式冷水机组	制冷量:3 868 kW	功率:685.0 kW	2	1 156.82
离心式水冷式冷水机组	制冷量:8 790 kW	功率:1 552.0 kW	1	
冷却水循环泵	流量:900 m <sup>3</sup> /h; 扬程:31.0 m	功率:160.0 kW	2	20.60
冷却水循环泵	流量:819 m <sup>3</sup> /h; 扬程:31.0 m	功率:132.0 kW	2	
冷冻水循环泵	流量:670 m <sup>3</sup> /h; 扬程:33.0 m	功率:110.0 kW	2	17.60
冷冻水循环泵	流量:763 m <sup>3</sup> /h; 扬程:29.0 m	功率:110.0 kW	2	
综合水处理器	流量:50 m <sup>3</sup> /h	功率:0.1 kW	2	2.40
综合水处理器	流量:80 m <sup>3</sup> /h	功率:0.1 kW	1	
冷却塔	流量:800 m <sup>3</sup> /h	功率:22.0 kW	2	108.00
冷却塔	流量:2000 m <sup>3</sup> /h	功率:90.0 kW	1	
总计				1 316.62

### 2.3 费用计算

1) 初投资。上述两种冷热源方案初投资中的设备费见表 3 与表 4。方案 1、方案 2 配电费根据式(3)计算,安装配电设施费用取 180 元/kW。方案 1、方案 2 安装费与设备费之比分别为 20%、15%。方案 1 和方案 2 的初投资见表 5。

2) 运行与维护费用。方案 1 制冷季运行总功率为 2 490.4 kW;供暖季运行总功率为 3 073.6 kW,蒸汽耗量为 5.2 t/h。方案 2 制冷季运行总功率为 4 192.21 kW;供暖季运行总功率为 180 kW,蒸汽耗量为 16.7 t/h。电费单价取 0.67 元/(kW·h),蒸汽单价取 165 元/t。根据表 2 的负荷频率以及式(5)、式(6),两种方案的年运行费用见表 6。

表 5 初投资汇总

万元

方案	设备费	配电费	安装费	打孔费	合计
方案 1	1 404.45	65.09	280.89	1 938.40	3 688.83
方案 2	1 316.62	92.59	197.49	—	1 606.70

表 6 年运行费用汇总

万元

方案	电费	蒸汽费	合计
方案 1	384.89	61.11	446.00
方案 2	215.63	356.00	571.63

3) 碳排放费用。根据表 1 中蒸汽与电力折合标准煤参考系数以及两种方案的电力、蒸汽耗量,可得方案 1、方案 2 每年消耗能源折合标准煤质量分别为 3 488.25 和 7 647.40 t。每吨标准煤燃烧释放 CO<sub>2</sub> 质量取 2.69 t,碳价取 58.8 元/t,根据式(7),方案 1 年碳排放费用为 55.17 万元,方案 2 年碳排放费用为 120.96 万元。

### 2.4 结果分析

根据两种方案的初投资、运行与维护费用,结合式(1),生命期取 20 年,基准折现率取 3.24%,不考虑碳排放费用时,方案 1 和方案 2 的全生命周期成本分别为 10 179.31 和 9 925.43 万元;考虑碳排放费用后,两种方案的全生命周期成本分别为 10 982.18 和 11 685.72 万元。两种方案考虑碳排放费用前后全生命周期成本如图 1 所示。

初投资方面,方案 1 比方案 2 高 2 082.13 万元,主要由于离心式冷水机组单台制冷量大,且汽-水板式

换热机组设备价格低,导致初投资较低;土壤源热泵价格相较于离心式水冷式冷水机组偏高,且需要考虑埋管打孔回填所耗费用,导致方案1初投资高于方案2。

年运行费用方面,方案1相对于方案2低125.63万元,主要得益于方案1较低的蒸汽耗量。

如图1(a)所示,当不考虑碳排放费用时,方案1的全生命周期成本高于方案2,但一旦考虑碳排放费用,方案2每年成本会比方案1额外高出65.79万元。如图1(b)所示,考虑碳排放费用后,方案1的全生命周期成本会低于方案2。

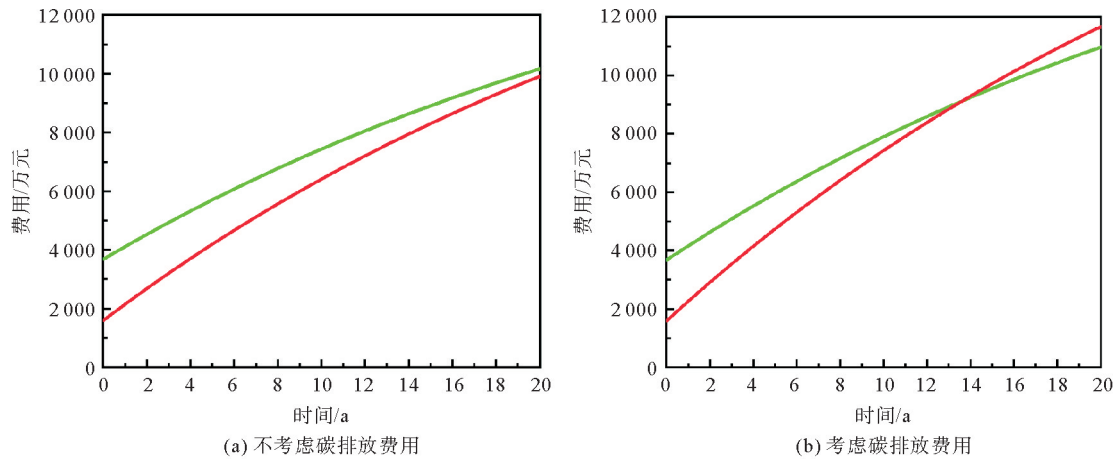


图1 考虑碳排放费用前后两种方案LCC

— 方案1; — 方案2

### 3 结论

本文提出考虑碳排放费用的冷热源配置方法,并建立考虑碳排放费用的全生命周期成本数学模型,主要得出以下结论:

1) 考虑碳排放费用的冷热源配置方法囊括了冷热源方案的全生命周期成本中各项主要影响因素,不仅可以避免选取实际成本更高的冷热源方案,还能够减少建筑运行阶段碳排放量,利于“双碳”目标的达成。

2) 碳排放费用对冷热源方案的全生命周期成本具有显著影响,主要体现在后期费用的增加,一般而言,减少后期费用是降低全生命周期成本的关键。因此,碳排放费用可能导致冷热源方案的选取发生变化。

3) 在考虑碳排放费用后,方案2的生命期成本由9 925.43万元增加至11 685.72万元,碳排放费用占比15.06%;方案1的全生命周期成本由10 179.31万元增加至10 982.18万元,碳排放费用仅占比7.31%。原本具有经济性优势的方案在考虑碳排放费用后可能将失去经济性优势。

因此,在对冷热源方案进行经济性分析时不可忽略碳排放费用,本文提出的考虑碳排放费用的冷热源配置方法更符合实际冷热源配置应用。

#### 参考文献(References):

- [1] 佚名. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2022年)[J]. 建筑,2023(2):57-69.  
Anon. Research report on energy consumption and carbon emissions of buildings in China(2022) [J]. Construction and Architecture, 2023(2):57-69.
- [2] 蔡斌. 设备寿命周期费用评价法及其应用[J]. 攀枝花大学学报,1997,14(2):78-81.  
CAI Bin. Equipment life cycle cost evaluation method and its application[J]. Journal of Panzhihua University,1997,14(2):78-81.
- [3] 龙惟定. 物业设施管理与暖通空调[J]. 暖通空调,1998,28(4):25-29.  
LONG Weiding. Facility management and HVAC[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,1998,28(4):25-29.

- [4] 罗志冬,胡松涛,刘光乘.某医院空调系统冷热源的经济性对比分析[J].青岛理工大学学报,2015,36(3):68-71.  
LUO Zhidong, HU Songtao, LIU Guangcheng. Economy contrast analysis of hot and cold source in a hospital air-conditioning system[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2015, 36(3): 68-71.
- [5] 周楠,郭健翔,赵向明.基于全生命周期的建筑与供热空调系统一体化设计[J].青岛理工大学学报,2017,38(1):95-98.  
ZHOU Nan, GUO Jianxiang, ZHAO Xiangming. Integrated design of building and HVAC based on full life-cycle theory[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2017, 38(1): 95-98.
- [6] 张晓霞,王刚.某工程空调冷热源方案决策及优化[J].青岛理工大学学报,2019,40(6):110-116.  
ZHANG Xiaoxia, WANG Gang. Decision-making and optimization of air conditioning cold-and-heat source schemes for a project[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(6): 110-116.
- [7] 王勇,赖道新,范维.基于全寿命周期成本方法的地表水源热泵系统分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2011,43(1):75-80.  
WANG Yong, LAI Daoxin, FAN Wei. System analysis of surface water heat pump based on life cycle total cost method[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2011, 43(1): 75-80.
- [8] 陈超,薄艾,刘亚运,等.建筑碳排放量计算方法发展历程[J].工程质量,2023,41(5):60-65.  
CHEN Chao, BO Ai, LIU Yayun, et al. The calculation method development of building carbon emissions[J]. Construction Quality, 2023, 41(5): 60-65.
- [9] PETROVIC B, MYHREN A J, ZHANG X, et al. Life cycle assessment of a wooden single-family house in Sweden[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113253.
- [10] KOFOROWOLA O F, GHEEWALA S H. Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(6): 498-511.
- [11] SUZUKI M, OKA T. Estimation of life cycle energy consumption and CO<sub>2</sub> emission of office buildings in Japan[J]. Energy and Buildings, 1998, 28(1): 33-41.
- [12] 胡玉坤,沈致和,慈超.地源热泵空调系统生命周期碳排放研究[J].制冷与空调,2017,31(2):140-144.  
HU Yukun, SHEN Zhihe, CI Chao. Carbon emissions research in life cycle of ground source heat air conditioning system[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2017, 31(2): 140-144.
- [13] 杨海龙.合肥市某会展中心空调冷热源改造方案碳排放分析[J].绿色建筑,2024(1):34-37.  
YANG Hailong. Carbon emission analysis of air-conditioning cold and heat source retrofit program for a convention and exhibition center in Hefei[J]. Green Building, 2024(1): 34-37.
- [14] 李辉,易继锋,汤小亮,等.不同空调冷热源对建筑碳排放量的影响分析[J].绿色建筑,2024(3):142-146.  
LI Hui, YI Jifeng, TANG Xiaoliang, et al. Analysis of the impact of different types of air conditioning cooling and heating sources on carbon emissions of buildings[J]. Green Building, 2024(3): 142-146.
- [15] 胡成亚,康诗月,李鸿,等.碳中和视角下空调系统冷热源方案分析[J].江苏建筑,2022(S2):97-100.  
HU Chengya, KANG Shiyue, LI Hong, et al. Analysis of cold and heat sources of HVAC from carbon neutral perspective[J]. Jiangsu Construction, 2022(S2): 97-100.
- [16] 罗云.促进设备寿命周期费用方法应用的考虑[J].中国设备管理,1992(12):16.  
LUO Yun. Considerations for facilitating the application of the life cycle cost methodology for equipment[J]. China Plant Engineering, 1992(12): 16.
- [17] 金家善,邵立周. LCC 分析的简化方法[J]. 中国设备工程, 2003(9): 6-8.  
JIN Jiashan, SHAO Lizhou. Simplified method for LCC analysis[J]. China Plant Engineering, 2003(9): 6-8.
- [18] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
National Bureau of Statistics. Department of Energy Statistical. China energy statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [19] GB 50189—2015, 公共建筑节能设计标准[S].  
GB 50189—2015, Design standard for energy efficiency of public buildings[S].

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)