

# 地铁车站通风空调系统生命周期 CO<sub>2</sub> 排放量研究\*

秦 鹭 袁艳平 蒋福建

(西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 以地铁车站能耗和 CO<sub>2</sub> 排放量最多的车站通风空调系统作为研究对象,确定其 CO<sub>2</sub> 排放量计算方法,并探究其 CO<sub>2</sub> 排放特征。建立了基于生命周期理论的地铁车站通风空调系统 CO<sub>2</sub> 排放量计算模型。以计算模型和工程实例参数为依据,计算分析了典型车站通风空调系统生命周期 CO<sub>2</sub> 排放量。结果表明,案例车站的 CO<sub>2</sub> 排放强度明显高于普通建筑,每年单位制冷量所产生的 CO<sub>2</sub> 排放量达 917.39 kg/(kW·年);CO<sub>2</sub> 排放量在运行阶段生命周期中占比最大,达 97.87%;冷源水系统在各子系统中排放量占比最大,为 39.42%。

**关键词** 地铁车站; 通风空调系统; 生命周期; CO<sub>2</sub> 排放量  
**中图分类号** U231.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.030

## Research on Life Cycle Carbon Emission of Metro Station Ventilation and Air Conditioning System

QIN Ao, YUAN Yanping, JIANG Fujian

**Abstract** Metro station ventilation and air conditioning system that accounts for the most energy consumption and carbon emission is selected as the research objective to determine the calculation method of its carbon emission and explore the carbon emission characteristics. In this paper, a carbon emission calculation model for metro station ventilation and air conditioning system based on the life cycle theory is established, it calculates the life cycle carbon emissions of typical station ventilation and air conditioning system according to the calculation model and engineering example parameters. The results show that the CO<sub>2</sub> emission intensity of the case station is significantly higher than that of ordinary buildings, and CO<sub>2</sub> emission of the annual unit refrigerating capacity is 917.39 kg/(kW·year); the operation stage accounts for the largest proportion in the life cycle, reaching 97.87%; and the 39.42% emission of cold source water system accounts for the largest proportion among all subsystems.

**Key words** metro station; ventilation and air conditioning

system; life cycle; carbon emission

**Author's address** School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

准确地计算和评估地铁车站通风空调系统生命周期的 CO<sub>2</sub> 排放量,是实现城市轨道交通系统节能减排的重点工作之一。地铁车站通风空调系统的运营时间、设备类型、施工工艺等都与常规公共建筑存在许多差异,其能耗特征亦有很大不同<sup>[1]</sup>,致使现有研究成果无法直接应用至地铁车站通风空调系统中。因此,本文结合生命周期评价理论,建立基于地铁通风空调系统结构特点的 CO<sub>2</sub> 排放量计算流程和评估方法,并对实际案例中的 CO<sub>2</sub> 排放特征进行了分析。

## 1 地铁车站通风空调系统构成

目前,我国常见的地铁车站通风空调系统制式有开式系统、闭式系统、屏蔽门系统。无论何种制式的系统都可以认为是由车站公共区空调通风系统、车站设备管理房通风空调系统、区间隧道通风系统、冷源水系统<sup>[2]</sup>等4个子系统构成。文献[3]显示,国内新建与改建的地铁车站通风空调系统制式主要为屏蔽门系统。故本文以国内典型的屏蔽门式车站为例,根据生命周期理论,将地铁车站通风空调系统生命周期划分为生产、运输和安装、运行、拆除和回收等4个阶段,从而对系统生命周期各阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量进行研究。

本文根据地铁车站通风空调系统(见图1)的结构特点,构建了生命周期各阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量计算模型。对于该系统中的每个子系统,都将其视为机组设备、管道等单元构件的集合。对地铁车站通风空调系统生命周期各阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量进行计算时,都应结合车站所采用的具体通风空调系统制

\* 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682020CX30)

式,按照总系统-子系统-元构件的顺序分解,计算出各单元构件的  $\text{CO}_2$  排放量而后集成,进而得到该系统的  $\text{CO}_2$  总排放量。

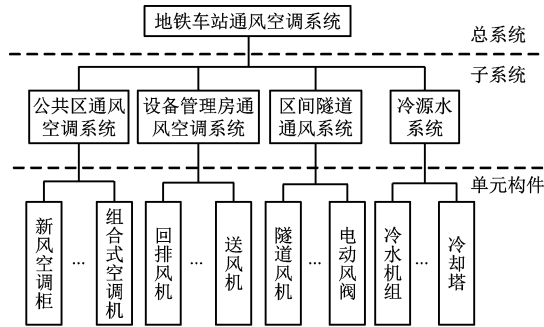


图1 地铁车站通风空调系统构成

Fig.1 Composition of ventilation and air conditioning system at metro station

## 2 地铁车站通风空调系统生命周期 $\text{CO}_2$ 排放量计算模型

地铁车站规模不一,所采用的通风空调系统形式各异。为使不同类型的系统之间能够进行  $\text{CO}_2$  排放强度比较,本文选取通风空调系统每年单位制冷量所产生的  $\text{CO}_2$  排放量  $C_L$  作为  $\text{CO}_2$  排放评价指标:

$$C_L = C_s / (Qy) \quad (1)$$

式中:

$C_s$ ——地铁车站通风空调系统生命周期产生的  $\text{CO}_2$  排放总量;

$Q$ ——地铁车站通风空调系统主机额定制冷量;

$y$ ——地铁车站通风空调系统的运行寿命。

### 2.1 生产阶段 $\text{CO}_2$ 排放量计算模型

生产阶段  $\text{CO}_2$  排放量  $C_{pr}$  的计算公式为:

$$C_{pr} = \sum_k \sum_i \sum_n (M_{k,i,n} W_{k,i,n}) + \sum_k \sum_i \sum_l (E_{k,i,l} U_{k,i,l}) \quad (2)$$

式中:

$k$ ——地铁车站通风空调系统中的子系统种类;

$i$ ——子系统内的单元构件种类;

$n$ ——材料种类;

$l$ ——能耗种类;

$M_{k,i,n}$ ——第  $k$  种子系统、第  $i$  种单元构件中第  $n$  种材料的使用量;

$W_{k,i,n}$ ——第  $k$  种子系统、第  $i$  种单元构件中第

$n$  种材料的  $\text{CO}_2$  排放系数;

$E_{k,i,l}$ ——第  $k$  种子系统、第  $i$  种单元构件在生产阶段的第  $l$  种能源的消耗量;

$U_{k,i,l}$ ——第  $k$  种子系统、第  $l$  种能源的  $\text{CO}_2$  排放系数。

由于地铁车站通风空调系统中设备众多,且各类设备中的具体材料种类及所占比例也各异,因此,对其生产阶段的资源、能源消耗等基础数据的搜集和整理是一项对时间和人力耗费都极大的工作<sup>[4]</sup>。本文在国内学者对相关设备及构件生产阶段资源、能源消耗研究的基础上,对基础的清单数据进行遴选和整理,将材料、能源的  $\text{CO}_2$  排放系数代入,换算得到各种设备生产阶段的  $\text{CO}_2$  排放数据并进行总结,进而提出单位质量设备生产阶段综合  $\text{CO}_2$  排放量。其计算公式为:

$$p_i = \sum_n (m_n W_n) + \sum_l (e_l U_l) \quad (3)$$

式中:

$p_i$ ——单位质量的第  $i$  种单元构件生产阶段综合  $\text{CO}_2$  排放量;

$m_n$ ——单位质量的第  $i$  种单元构件中第  $n$  种材料的质量;

$e_l$ ——生产单位质量的第  $i$  种单元构件所需的第  $l$  种能源的消耗量。

将式(3)代入式(2),则生产阶段的  $\text{CO}_2$  排放量计算公式简化为:

$$C_{pr} = \sum_k \sum_i (m_{k,i} p_{k,i}) \quad (4)$$

式中:

$m_{k,i}$ ——第  $k$  种子系统中第  $i$  种单元构件的质量。

### 2.2 运输阶段 $\text{CO}_2$ 排放量计算模型

运输阶段  $\text{CO}_2$  排放量的计算公式为:

$$C_{tr} = \sum_k \sum_t \sum_i (M_{k,i,t} U_{k,i,t} L_{k,i,t}) \quad (5)$$

式中:

$C_{tr}$ ——运输阶段  $\text{CO}_2$  排放量;

$t$ ——运输方式的种类;

$M_{k,i,t}$ ——第  $k$  种子系统中以第  $t$  种方式运输的单元构件  $i$  的质量;

$L_{k,i,t}$ ——第  $k$  种子系统中以第  $t$  种方式运输的单元构件  $i$  的运输距离;

$U_{k,i,t}$ ——第  $k$  种子系统中第  $t$  种运输方式的  $\text{CO}_2$  排放系数。

2.3 安装阶段 CO<sub>2</sub> 排放量计算模型

安装阶段 CO<sub>2</sub> 排放量的计算公式为：

$$C_{ct} = \sum_k \sum_c (Q_{k,c} E_{k,c} U_c) \tag{6}$$

式中：

$C_{ct}$ ——安装阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量；

$c$ ——安装工艺的种类；

$Q_{k,c}$ ——第  $k$  项子系统中第  $c$  种安装施工工艺的工程量；

$E_{k,c}$ ——第  $k$  项子系统中第  $c$  种安装施工工艺的单位工程量所产生的能耗；

$U_c$ ——第  $c$  种安装施工工艺所消耗能源的 CO<sub>2</sub> 排放系数。

2.4 运行阶段 CO<sub>2</sub> 排放量计算模型

运行阶段的年 CO<sub>2</sub> 排放量  $C_{op}$  计算公式为：

$$C_{op} = \sum_k \sum_f (P_a T_a N_{k,f} U_{k,f} D_{k,a}) + \sum_k \sum_f (P_v T_v N_{k,f} U_{k,f} D_{k,v}) \tag{7}$$

式中：

$f$ ——能耗设备的种类；

$N_{k,f}$ ——第  $k$  种子系统中第  $f$  种耗能设备的数量；

$U_{k,f}$ ——第  $k$  种子系统中第  $f$  种耗能设备的 CO<sub>2</sub> 排放系数；

$P_a$ ——空调季节第  $k$  种子系统中第  $f$  种耗能设备以模式  $a$  运行的功率；

$P_v$ ——非空调季节第  $k$  种子系统中第  $f$  种耗能设备以模式  $v$  运行的功率；

$T_a$ ——空调季节第  $k$  种子系统中第  $f$  种耗能设备每天以模式  $a$  运行的时间；

$T_v$ ——非空调季节第  $k$  种子系统中第  $f$  种耗能设备每天以模式  $v$  运行的时间；

$D_{k,a}$ ——每年地铁车站通风空调系统第  $k$  种子系统空调季节；

$D_{k,v}$ ——每年车站通风空调系统第  $k$  种子系统非空调季节。

2.5 计算模型中 CO<sub>2</sub> 排放系数的选择

CO<sub>2</sub> 排放系数是指消耗单位质量的能量或原材料所产生的 CO<sub>2</sub> 气体的质量。本文依据文献[5-10],整理了 CO<sub>2</sub> 排放量计算模型中基于能源、材料和运输方式的 CO<sub>2</sub> 排放系数,见表 1。

2.6 计算模型中生产阶段 CO<sub>2</sub> 排放基础数据的确定

本文基于对实际地铁车站通风空调系统设备

类型的调研,根据文献[6,10-11]中所记录的建筑设备生产阶段资源与能源消耗数据,将各类能源与材料的 CO<sub>2</sub> 排放系数代入,换算得到生产阶段单位质量主要设备的综合 CO<sub>2</sub> 排放量  $p_i$ ,见表 2。

表 1 基于能源、材料、运输方式的 CO<sub>2</sub> 排放系数  
Tab.1 CO<sub>2</sub> emission coefficients of materials, energy sources and transportation methods

能源	CO <sub>2</sub> 排放系数	材料	CO <sub>2</sub> 排放系数/(kg/kg)	运输方式	CO <sub>2</sub> 排放系数/(kg/(km·t))
电力	0.973 kg/(kW·h)	钢材	1.790	公路	0.123
汽油	3.070 kg/kg	铜材	10.910	铁路	0.014
柴油	3.185 kg/kg	铝材	19.020	航空	1.130
天然气	2.693 kg/m <sup>3</sup>	PVC	6.400	水路	0.037

表 2 地铁车站通风空调系统单位质量的主要设备生产阶段综合 CO<sub>2</sub> 排放量  
Tab.2 Comprehensive CO<sub>2</sub> emission per unit weight of ventilation and air-conditioning system main equipment at subway stations in the production process

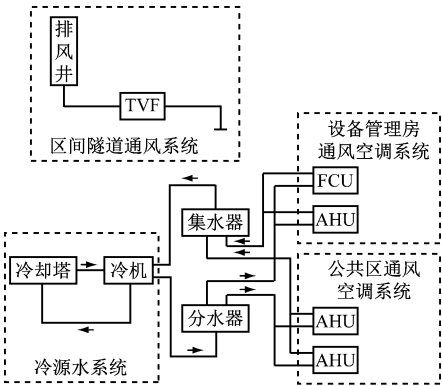
设备类型	$p_i$ /kg	设备类型	$p_i$ /kg
风冷涡旋式冷水机组	4.040	空调水泵	2.462
风冷螺杆式冷水机组	4.278	轴流通风机	2.275
水冷涡旋式冷水机组	3.766	离心通风机	2.549
水冷螺杆式冷水机组	4.564	FCU(风机盘管)	4.258
水冷离心式冷水机组	4.429	方形冷却塔	3.576
AHU(空调箱)	3.844	圆形冷却塔	4.146

3 地铁车站通风空调系统 CO<sub>2</sub> 排放量计算案例分析

3.1 案例基本概况

本文选取的案例为贵阳轨道交通 1 号线(以下简为“1 号线”)某典型屏蔽门系统车站的通风空调系统(见图 2)。其中,公共区空调通风系统采用一次回风全空气系统,设备管理房通风空调系统采用一次回风全空气系统和空气-水系统,冷源水系统采用一次泵变流量系统,区间隧道通风系统设置隧道风机。

生产阶段 CO<sub>2</sub> 排放量的计算输入参数取自本文第 2 节的地铁车站通风空调系统生产阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量数据。案例车站通风空调系统主要设备各阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量,如表 3 所示。运输阶段的运输方式假设为全部采用公路运输,运输距离根据《中



注:TVF 为隧道风机。

图 2 1 号线某典型屏蔽门系统车站通风空调系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of ventilation and air-conditioning system at Line 1 station

表 3 案例车站通风空调系统主要设备各阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量

Tab.3 CO<sub>2</sub> emission parameters of station main equipment ventilation and air conditioning system at various stages

设备类型	数量	设备总功率/kW	生命周期不同阶段 CO <sub>2</sub> 排放量/kg		
			生产阶段	运输安装阶段	运行阶段
冷水机组	2	112.0	20 993.94	349.75	2 073 000.83
空调水泵	4	30.0	2 702.95	84.20	275 407.65
冷却塔	2	22.0	7 189.75	308.87	818 779.50
通风机	24	323.0	62 849.24	53 521.10	2 064 125.39
风机盘管	2	0.6	332.09	19.13	31 525.20
空调箱	13	59.0	20 965.15	4 424.70	2 763 664.17

3.2 地铁车站通风空调系统与普通建筑通风空调系统 CO<sub>2</sub> 排放量对比分析

对比文献[8,10]中的 8 个普通建筑通风空调系统案例中的 CO<sub>2</sub> 排放数据,发现普通建筑通风空调系统的 C<sub>L</sub> 取值范围为 424.18 ~ 809.54 kg/(kW·年),平均值为 553.12 kg/(kW·年)。本案例中的 C<sub>L</sub> 为 917.39 kg/(kW·年),比普通建筑通风空调系统 C<sub>L</sub> 的极大值高出 13.32%,比平均值高出 65.86%。由此可见,案例地铁车站通风空调系统的 CO<sub>2</sub> 排放强度明显高于普通建筑。主要原因在于:地铁车站通风空调系统运行强度极高,公共区通风空调系统设备在车站运营时间内始终开启,设备及管理用房中大部分房间的通风空调设备在全日 24 h 内均处于运行状态;地铁车站通风空调系统中设备容量一般按照运营远期峰值负荷进行选型。

3.3 地铁车站通风空调系统生命周期各阶段 CO<sub>2</sub> 排放量分析

当地铁车站通风空调系统使用寿命为 15 年时,生命周期各阶段 CO<sub>2</sub> 排放量所占比例分别为:生产

国统计年鉴 2016》<sup>[12]</sup>,取案例机电工程施工时(2016 年)的中国公路货物运输平均运距 182.81 km。安装阶段根据《城市轨道交通工程概算定额》<sup>[13]</sup>确定地铁车站通风空调系统安装工程的项目种类,以及各项目所需的施工机械种类;依照《铁路工程施工机具台班费用定额》<sup>[14]</sup>确定各种施工机械工作每台班所使用的能源类型和用量,代入能源的 CO<sub>2</sub> 排放系数换算得到施工机械每台班的 CO<sub>2</sub> 排放量;最后将施工机械每台班的 CO<sub>2</sub> 排放量代入各安装工程项目,换算得到该项目的 CO<sub>2</sub> 排放量。地铁车站通风空调系统使用寿命依据工程资料设为 15 年,每日运营时间为 06:00—23:00,每年空调季节为 150 d。

阶段 1.4%,运输和安装阶段 0.73%,运行阶段 97.87%。案例车站生命周期各阶段 CO<sub>2</sub> 排放量,如表 4 所示。由表 4 可知,运行阶段是 CO<sub>2</sub> 排放量最多的阶段,生产阶段和运输安装阶段所产生的 CO<sub>2</sub> 排放量所占比例较小。因此,应重点针对运行阶段进行 CO<sub>2</sub> 减排。

表 4 案例车站生命周期各阶段 CO<sub>2</sub> 排放量

Tab.4 CO<sub>2</sub> emissions at the life cycle stages of the case station

生命周期阶段	CO <sub>2</sub> 排放量/t
生产阶段	115.03
运输和安装阶段	60.24
运行阶段	8 026.50
总计	8 201.46

4 结语

本文建立了适用于地铁车站通风空调系统的生命周期各阶段 CO<sub>2</sub> 排放量计算模型。遴选和整

理了常用设备生产阶段的资源、能源消耗清单,通过换算得到生产阶段的  $\text{CO}_2$  排放数据,在此基础上提出以生产阶段单位质量的综合  $\text{CO}_2$  排放量作为地铁站通风空调系统设备生产阶段的  $\text{CO}_2$  排放单位。基于对实例的计算和分析,发现地铁站通风空调系统的  $\text{CO}_2$  排放强度远高于普通建筑通风空调系统,其低碳评价和  $\text{CO}_2$  减排应受到更多重视。

## 参考文献

- [1] 杨乐. 地铁站用能特征与节能策略研究[D]. 北京:清华大学,2017.  
YANG Le. Research on the energy use characteristics and energy saving strategies of metro stations [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [2] 边志美. 地铁屏蔽门、闭式和开式系统环控能耗分析研究[D]. 上海:同济大学,2007.  
BIAN Zhimei. Analysis and research on environmental control energy consumption of metro platform screen door, closed and open system [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [3] 隋学敏,王靖宜,郭磊,等. 屏蔽门系统地铁站空调负荷研究现状及展望[J]. 铁道标准设计,2019(12):141.  
SUI Xuemin, WANG Jingyi, GUO Lei, et al. Research status and prospect on air-conditioning load of metro station with platform screen door [J]. Railway Standard Design, 2019(12):141.
- [4] 刘彦宾,王晓涛,林波荣,等. 建筑部品及设备生命周期能耗数据研究进展[J]. 建筑科学,2011(增刊2):255.  
LIU Yanbin, WANG Xiaotao, LIN Borong, et al. Research progress in life cycle energy consumption data of building assembly and equipment [J]. Architecture Science, 2011(S2):255.
- [5] 李兆坚. 我国城镇住宅空调生命周期能耗与资源消耗研究[D]. 北京:清华大学,2007.  
LI Zhaojian. Study on the life cycle consumption of energy and resource of air conditioning in urban residential buildings in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [6] 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(2):140.  
HU Yukun, SHEN Zhihe, CI Chao. Carbon emissions research in life cycle of ground source heat air-conditioning system [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2017(2):140.
- [7] 任志勇. 基于LCA的建筑能源系统碳排放计算研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.  
REN Zhiyong. Research on carbon emission calculation of building energy system based on LCA [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [8] 姜文秀,蔡亮,蔡君巍,等. 集中式空调系统生命周期碳排放评估[J]. 建筑科学,2014(4):31.  
JIANG Wenxiu, CAI Liang, CAI Junwei, et al. Assessment on life cycle carbon emission of centralized air conditioning system [J]. Architecture Science, 2014(4):31.
- [9] 张涛,蔡亮,张建忠,等. 双冷源空调系统生命周期内碳排放研究[J]. 建筑热能通风空调,2016(2):9.  
ZHANG Tao, CAI Liang, ZHANG Jianzhong, et al. Life cycle carbon emissions research of double cold source air conditioning system [J]. Building Thermal Energy Ventilation and Air Conditioning, 2016(2):9.
- [10] 蔡君巍. 中央空调系统的碳排放评估及低碳化对策研究[D]. 南京:东南大学,2012.  
CAI Junwei. Research of carbon emission assessment and low-carbon countermeasures of central air-conditioning [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.
- [11] 王育忠. 建筑空调设备生命周期二氧化碳排放量评估[D]. 台南:成功大学,2007.  
WANG Yuzhong. Life cycle carbon dioxide emissions assessment of building air-conditioning equipment [D]. Tainan: Cheng Kung University, 2007.
- [12] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2016[M]. 北京:中国统计出版社,2016.  
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook 2016 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程概算定额第七册机电设备安装工程[M]. 北京:中国计划出版社,2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Urban rail transit project budget estimate and quota, volume 7, mechanical and electrical equipment installation project [M]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [14] 国家铁路局. 铁路工程施工机具台班费用定额[M]. 北京:中国铁道出版社,2017.  
National Railway Administration. Fixed cost of railway engineering construction machinery shift [M]. Beijing: China Railway Press, 2017.

(收稿日期:2019-11-04)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—51030704