

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-650-06

某教育建筑暖通空调系统低碳设计量化分析

周 鹏

(同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092)

【摘要】 就某教育建筑暖通空调系统设计中采用的直埋管土壤热泵冷热源形式和室内采用的主动式冷梁空调末端形式, 结合相关碳排放软件计算, 与传统冷水机组加燃气热水锅炉或风冷热泵采暖水机组的冷热源形式和风机盘管空调末端形式进行量化比较, 以探讨地源热泵和主动式冷梁系统的设计对降低建筑运行能耗碳排放的影响。

【关键词】 地源热泵; 主动式冷梁; 碳排放
中图分类号 TU831 文献标识码 A

Quantitative Research on Low Carbon Design of HVAC System in an Educational Building

Zhou Peng

(Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd, Shanghai, 200092)

【Abstract】 This paper combines with the related carbon emission calculation, compares the ground-source heat pump and indoor active chilled beam air conditioning terminal of an educational building, with the traditional water cooling chiller & gas fired boiler and fan coil air conditioning terminal form, to discuss the influence of ground-source heat pump and active chilled beam system design to reduce the building energy consumption carbon emissions.

【Keywords】 ground-source heat pump; active chilled beam; carbon emission

作者(通讯作者)简介: 周 鹏(1974.5-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: zhoupeng58@163.com
收稿日期: 2022-03-20

0 引言

建筑运行能耗是我国能源消耗系统的主体之一, 也是碳排放的重要来源。在“碳达峰”和“碳中和”的“双碳”目标背景下, 减少建筑运行能耗, 降低建筑碳排放是行业发展的必然方向。暖通空调系统在建筑运行能耗中的占比较高, 通常达到40%~50%, 因此暖通空调系统的低碳化设计也是势在必行^[4,6]。

在目前“双碳”背景下, 对于暖通空调系统的设计, 可以采用哪些节能低碳化的设计方向和措施, 这些措施对于降低建筑物运行能耗碳排放值的贡献有多少, 需要相关技术人员对此有一定的量化概念^[2,3]。而建筑碳排放计算则是量化各类措施节能减碳效果的有效手段, 可以直观的看出各节能措施的减碳效果。

利用可再生能源是暖通空调系统低碳化设计的有效途径^[2], 地源热泵系统作为可再生能源, 可以有效减少建筑的碳排放^[3]。本文以某教育建筑的暖通空调系统为研究对象, 通过建筑碳排放计算, 对该项目所采用的“地源热泵冷热源和主动式冷梁空调末端”的空调系统形式进行量化分析, 以探讨地源热泵和主动式冷梁末端对降低碳排放的影响程度。

1 项目概况

本建筑为从幼儿园到高中的 K-12 国际学校, 位于上海市, 属夏热冬冷地区, 总建筑面积 58380 平方米, 其中地上建筑面积 42365 平方米, 地下建筑面积 16015 平方米, 地上 5 层, 地下 1 层, 建筑高度 24 米, 建筑形态如图 1 所示。

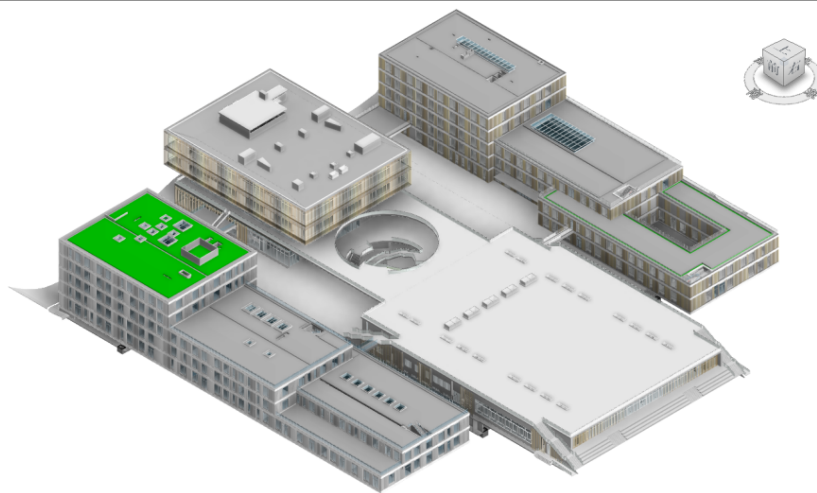


图 1 建筑形态示意图

Fig.1 Schematic diagram of building form

建筑内的主要房间功能和室内设计参数如表 1 所示。根据 LEED 铂金认证的要求, 本项目中房间新风量按 ASHRAE 方法计算^[12], 并采取加大

30%新风量取值, 表格中各房间人员新风量为总新风量除以总人数换算出的平均值。

表 1 室内设计参数表

Table 1 Indoor Design Parameter

房间名称	夏季		冬季		人员密度 人/m ²	新风量 m ³ /(h·p)	噪声 dB(A)
	温度/°C	相对湿度/%	温度/°C	相对湿度/%			
幼儿园教室	25	50	20	--	0.13	38	40
小学教室	25	50	20	--	0.36	38	40
中学教室	25	50	20	--	0.36	38	40
办公室	25	50	20	--	0.125	50	42
图书阅览室	25	60	20	40	0.2	38	37
实验室	25	60	20	--	0.25	38	45
体育馆	25	60	20	30	0.156	60	45
游泳馆	28	60	28	60	0.288	50	45
剧院	26	60	20	30	0.957	20	35
餐厅	25	60	18	--	0.664	25	45

本项目空调系统冷热源采用土壤源地埋管式地源热泵系统, 并设有备用闭式冷却塔, 夏季如土壤温度偏高时可开启使用。室内空调末端体育馆、游泳馆、剧院等大空间设置为全空气系统, 教室和办公区域则采用主动式冷梁加变风量新风系统。其中, 主动式冷梁空调末端系统是一种集制冷、供热和通风功能为一体的空调系统, 它能够提供良好的室内气候环境及单独区域的控制。一次风主要用来消除室内湿负荷, 同时也可以供热、供冷和供给新风; 末端换热盘管用来进行室内热/冷负荷的处理。

经过新风机组集中热湿处理后的一次风, 由一次风接管进入静压箱, 通过喷嘴高速喷出, 在喷嘴附近产生负压, 诱导吸入室内二次回风, 室内二次回风通过冷梁水盘管冷却或加热后, 与一次风混合, 最后由条形风口送入室内。由于主动式冷梁没有循环风机, 可以节省大量末端风机的能耗^[5]。图 2 为主动式冷梁工作原理图^[1]。教室和办公区域的夏季室内设计温度为 25°C, 设计相对湿度 50%, 对应的机器露点温度为 14.7°C。为了避免冷梁发生结露, 冷梁的供水温度要求比露点温度高 3°C 以上, 同时

冷梁盘管的供回水温差为 3℃，因此，冷梁末端的设计供回水温度采用 18/21℃。采用冷梁末端的房间约占建筑总空调面积的 60%。

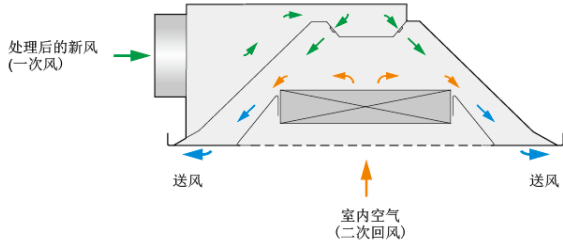


图 2 主动式冷梁工作原理图

Fig.2 Working principle of active chilled beam

除埋管式地源热泵冷热源主机和主动式冷梁系统外，本项目采取的节能技术手段尚有：地源热泵主机中的一台小容量机组设置为冷凝热回收型，回收热量供生活和常温泳池热水制备使用；新风机组设置有全热回收段，可部分回收集中排风的冷热能量；新风机组均采用变频风机，新风支管上设置变风量阀，新风系统变风量运行等。

2 运行阶段碳排放计算

根据《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366-2019 第 4.1.4 条，建筑运行阶段碳排放量应根据各系统不同类型能源消耗量和不同类型能源的碳排放因子确定，建筑运行阶段单位建筑面积的总碳排放量 (C_M) 按下列公式计算^[7]：

$$C_M = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (E_i EF_i) - C_p \right] y}{A} \quad (1)$$

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (2)$$

式中： C_M 为建筑运行阶段单位建筑面积碳排放量， kgCO_2/m^2 ； E_i 为建筑第 i 类能源年消耗量， kWh/a ； EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子， $\text{tCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ ； $E_{i,j}$ 为 j 类系统的第 i 类能源消耗量，单位/a； $ER_{i,j}$ 为 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； C_p 为建筑绿地碳汇系统年减碳量， kgCO_2/a ； y 为建筑设计寿命，a； A 为建筑面积， m^2 。

其中，建筑设计寿命 y 取 50 年，电网碳排放因子采用 2022 年上海电力排放因子^[8]。

$$EF = 4.2 \times 10^{-4} \text{ tCO}_2\text{e}/\text{kWh}$$

本文仅针对暖通空调系统的能耗进行碳排放

分析，依据《建筑碳排放计算标准》中第 4.2.2 条对暖通空调系统能耗计算方法的要求^[7]，采用华电源 HDY-SMAD 空调负荷计算软件对本项目进行负荷计算，计算得到本项目空调夏季最大冷负荷 5635kW，冬季最大热负荷 4255kW，年累计冷负荷 324.7 万 kWh，年累计热负荷 384.8 万 kWh。图 3 所示为计算得到的全年空调日累计负荷示意图。

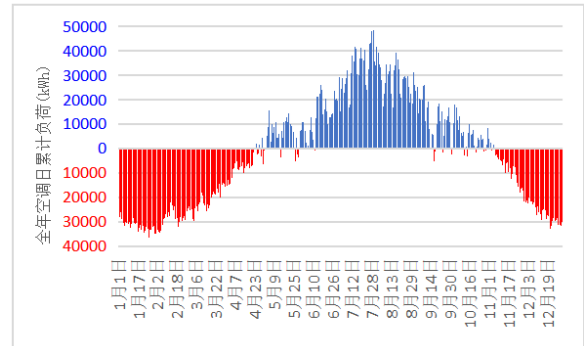


图 3 全年空调日累计负荷示意图

Fig.3 Daily cumulative load of HVAC

根据空调负荷计算结果，本项目配置 3 台埋管式地源热泵机组，单台制冷量 2000kW，制热量 1400kW。夏季供回水温度 7/12℃，冬季供回水温度 45/40℃。“传统冷水机组加锅炉冷热源”作为最常见的建筑空调冷热源形式，将其作为本次碳排放计算比较的基准对象。冷源配置 2 台单台制冷量 2500kW 的离心式水冷冷水机组和 1 台制冷量 1000kW 的螺杆式水冷冷水机组；热源则采用 3 台单台制热量 1400kW 的燃气热水锅炉。同时，另外设置了一组“传统风冷热泵冷暖水机组”作为冷热源进行对比，共配置 6 台风冷热泵冷暖水机组，单台制冷量 1000kW，制热量 700kW。

根据计算得到的日累计空调冷热负荷，以及设置的三种冷热源主机配置，利用 PKPM2022 版绿色建筑系列碳排放计算软件进行建模及碳排放计算。依据最新的节能要求，计算模型中的各围护结构参数、所有冷热源主机的性能系数或热效率值均采用《建筑节能与可再生能源利用通用规范》GB 55015-2021 中的规范限值作为计算值^[9]。

其中冷热源侧的碳排放计算包括冷热源主机、冷冻水泵、冷却水泵、热水泵和冷却塔的运行能耗碳排放值。本文的相关对比计算中，除风冷热泵冷暖水机组无冷却水泵外，其余各系统水泵流量与主机容量分别对应，冷冻水和冷却水侧供回水温差 5

℃, 锅炉热水侧供回水温差 10℃, 风热泵和地源热泵热水侧供回水温差 5℃, 另冷冻水泵、冷却水泵和热水泵的各自扬程参数均相同。

3 冷热源侧碳排放比较

先假定空调末端形式一致, 通过计算得到三种不同冷热源系统的碳排放值。其中, 以“传统冷水机组加锅炉冷热源”作为冷热源的系统, 其冷热源侧的供暖和空调碳排放的计算结果分别为: 供暖年能耗碳排放量 575.84t, 空调年能耗碳排放量 326.09t; 以“传统风冷热泵冷暖水机组”作为冷热源的系统, 其冷热源侧的碳排放计算结果为: 供暖年能耗碳排放量 317.48t, 空调年能耗碳排放量 426.22t; 本项目采用以“地埋管式地源热泵机组”作为冷热源的系统, 按前文所述的配置计算得到的碳排放结果为: 供暖年能耗碳排放量 336.10t, 空调年能耗碳排放量 359.07t。

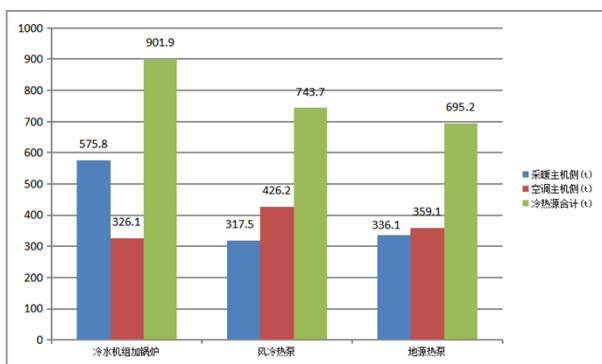


图 4 不同冷热源形式的碳排放计算结果对比

Fig.4 Comparison of carbon emission of different HVAC sources

图 4 所示为三种冷热源形式的碳排放计算结果对比图。通过量化计算可以得出, 在三种冷热源形式中, 空调年碳排放量最低的是水冷冷水机组, 最高的为风冷热泵冷暖水机组。如以传统水冷冷水机组为基准, 风冷热泵冷暖水机组的空调碳排放增加 30.7%, 地埋管式地源热泵机组的空调碳排放增加 10.1%。供暖碳排放最低的为风冷热泵冷暖水机组, 最高为燃气热水锅炉。以传统燃气热水锅炉作为比较基准, 风冷热泵机组作为热源的系统年碳排放量减少 44.9%, 地埋管式地源热泵机组作为热源的年碳排放减少 41.6%。

如果综合供暖、空调冷热源主机的全年碳排放

量, 则碳排放最低的冷热源系统为地埋管式地源热泵机组, 最高为水冷冷水机组加燃气热水锅炉。以传统水冷冷水机组加燃气热水锅炉作为基准, 风冷热泵冷暖水机组的供暖、空调全年碳排放之和减少 17.5%, 地埋管式地源热泵机组的供暖、空调全年碳排放之和减少 22.9%。

值得注意的是, 虽然地埋管式地源热泵机组在三种冷热源形式中全年碳排放最少, 但通过量化计算结果可以看到, 在本项目中, 地埋管式地源热泵相比风冷热泵其全年碳排放量仅减少了 6.5%, 单位建筑面积碳排放仅降低了 0.83kg/m²。同时, 考虑到地埋管地源热泵系统在地埋管打井、运输、安装等过程中的碳排放量较高^[10,11], 其全生命周期碳排放量相较于风冷热泵的优势将进一步缩小。

4 主动式冷梁的碳排放分析

本项目办公、教室空间的空调末端采用主动式冷梁加变风量新风系统形式, 该末端空调形式对建筑物运行能耗碳排放的影响主要体现在两个方面: 一是高供回水温度导致的冷热源配置调整对碳排放的影响, 二是末端空调设备风机运行能耗对碳排放的影响。

由于主动式冷梁末端为温湿度独立控制系统, 冷梁所需供回水温度为 18/21℃, 因此在冷热源配置方面, 可将本项目的地埋管式地源热泵主机调整为两个系统, 分别为主要供给全空气系统空调机组和变风量新风机组的“低温地源热泵机组系统”(供回水温度 7/12℃)和专供主动式冷梁末端的“高温地源热泵机组系统”(机组的供/回水温度为 16/21℃, 并通过混水调节至主动式冷梁所需的 18/21℃)。根据本项目中冷梁末端的占比, 调整后采用的主机配置为: 低温侧采用 2 台地源热泵机组, 单台制冷量 2000kW, 制热量 1400kW; 高温侧采用 2 台地源热泵机组, 单台制冷量 1000kW, 制热量 700kW。

提高地源热泵机组的冷冻水供/回水温度可以提高机组的 COP, 根据主流厂商提供的设计资料, 在供回水温差为 5℃时, 地源热泵机组蒸发器出水温度对 COP 值的影响如图 5 所示。图中可以看出, 当供水温度由 7℃提高 16℃时, 机组 COP 可提高

至 7.83。

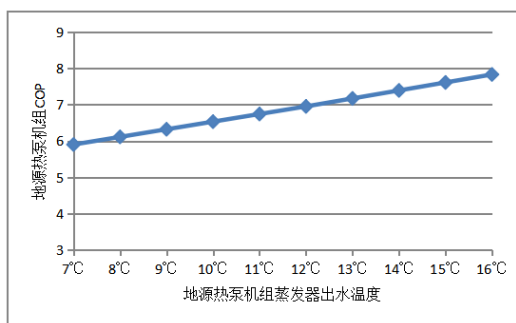


图 5 地源热泵机组蒸发器出水温度对 COP 值的影响

Fig.5 COP Effect of water outlet temperature of evaporator of ground source heat pump

根据高低温配置的地源热泵主机方案，经碳排放软件计算得到的供暖年能耗碳排放量为 336.10t，空调年能耗碳排放量为 341.14t，合计 677.24t。

图 6 所示为对应“主动式冷梁空调末端”的高低温地源热泵机组配置与对应“风机盘管空调末端”的单一温度常规地源热泵机组配置的冷热源侧碳排放对比。从图中可得出，由于两种系统冬季供回水温度均为 45/40°C，采用“主动式冷梁空调末端”的高低温地源热泵系统其冷热源侧的供暖碳排放值与采用“风机盘管末端”的常规系统相同，但空调碳排放值相较常规配置地源热泵系统则减少了 5.0%，供暖、空调的全年碳排放之和共减少了 2.6%。

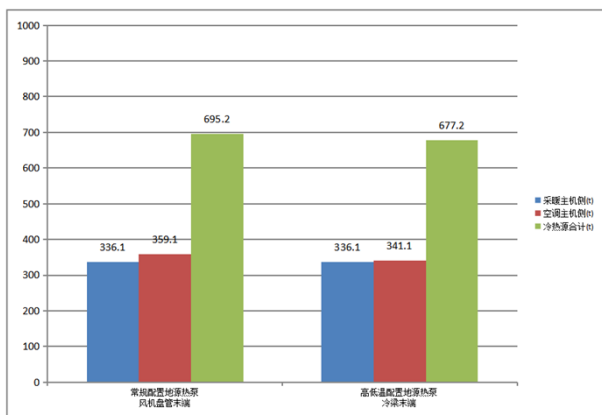


图 6 末端形式对冷热源侧碳排放的影响

Fig.6 Influence of terminal form on carbon emissions of cold and heat sources

在末端空调设备风机运行能耗方面，主动式冷梁系统为无风机动力型末端，无电力能耗。鉴于所采用的 PKPM 碳排放计算软件中空调末端形式尚无冷梁末端选项，计算中末端空调形式的比较参考

动力系统风机项。同时由于采用全空气系统和新风空调箱的区域在各模型中均相同，因此在末端能耗差异计算中简化忽略。计算中系统末端按风机盘管的设备选型，将风机参数输入动力系统风机项中，相应计算得到的动力系统能耗通风机碳排放值为 32.61t。由于假定主动式冷梁空调末端的耗电为零，即相较于风机盘管末端，采用无风机动力型冷梁末端时其设备风机运行能耗年碳排放可减少 32.61t。

在以地源热泵为冷热源的前提下，综合冷梁末端对冷热源侧的碳排放影响及冷梁本身减少的风机碳排放，在本项目中，采用冷梁末端与采用风机盘管末端相比共可降低碳排放 50.61t，约 7.3%，折合单位建筑面积碳排放降低了 0.87kg/m²。

5 综合冷热源和空调末端形式的碳排放比较

综合冷热源和空调末端形式，本项目所采用的“地源热泵冷热源和主动式冷梁空调末端”系统形式冷热源侧年碳排放 677.2t，室内空调末端年碳排放 0t。与“传统冷水机组加燃气热水锅炉和风机盘管末端”系统形式冷热源侧年碳排放 901.93t、室内空调末端年碳排放 32.61t 对比，可降低年碳排放 27.5%，其中，冷热源侧降低碳排放 24%，末端降低年碳排放 3.5%。与“传统风冷热泵冷暖水机组和风机盘管末端”系统形式对比，可减少碳排放 12.8%，其中，冷热源侧降低年碳排放 8.6%，末端降低年碳排放 4.2%。

6 结语

本文以上海地区某教育建筑为研究对象，主要就埋管式地源热泵冷热源形式和主动式冷梁空调末端形式进行碳排放量化分析，并与传统主机、末端形式的暖通空调系统运行能耗碳排放值进行比较研究。在本项目中，通过量化计算数据可以得到：

(1) 可再生能源形式中的埋管式地源热泵机组可明显降低建筑物运行能耗碳排放，以“传统冷水机组加燃气热水锅炉”为基准，相同供回水温度的地源热泵机组可降低碳排放约 22.9%；

(2) 考虑室内采用冷梁空调末端的影响，高低温配置的地源热泵机组可降低碳排放约 24%，综合末端能耗共可降低碳排放约 27.5%；

(3)与“传统风冷热泵冷暖水机组”相比,相同供回水温度的地源热泵机组年碳排放减少了6.5%。

(4)与“传统风冷热泵冷暖水机组和风机盘管末端”系统形式对比,“地源热泵冷热源和主动式冷梁空调末端”共可减少年碳排放12.8%,其中,冷热源侧减少碳排放8.6%,末端减少年碳排放4.2%。

地源热泵冷热源和主动式冷梁空调末端的系统形式,相比较传统的冷水机组加热水锅炉形式,可以有效的降低碳排放,助力“双碳”目标的实现。但根据本项目的量化计算结果,在夏热冬冷地区,相较于风冷热泵,地源热泵作为冷热源在减碳方面虽然具有一定的优势,但其优势并不如想象中明显。建议在将来综合不同建筑类型、项目初投资、全生命周期碳排放等方面,通过量化计算对地源热泵系统和风冷热泵系统的碳排放比较进行进一步研究。

鉴于碳排放计算的相关软件均为最新发布,部分内容尚待进一步优化,对于暖通空调系统中其他的节能减碳措施如风系统热回收侧、主机冷凝热回收侧、风机变频运行等均可以在今后继续深入研究探讨,以管窥豹,从量化的角度对暖通空调各类节能减碳措施进行分析,为“双碳”设计提供参考。

参考文献:

- [1] 刘芳. 地源热泵与主动式冷梁高效复合系统在学校建筑中的应用与设计[J].上海节能,2018,(4):242-247.
- [2] 张闻. 基于节能理念下的民用建筑暖通空调设计[J]. 工程技术研究,2018,(14):156-157.
- [3] 史源源. 暖通空调制冷系统中的节能环保技术分析[J]. 应用能源技术,2020,(4):34-38.
- [4] 瞿蕊,韩东君,朱亚丹. 被动式超低能耗建筑发展现状及思考[J].中外建筑,2021,(1):185-188.
- [5] 吴玉涛. 上海某商务办公楼暖通空调绿色、低碳设计[J]. 建筑节能,2016,44(10):18-22.
- [6] 陈守恭. 碳中和之路与被动式低能耗建筑[J]. 建设科技,2021,(18):14-18.
- [7] GB/T 51366-2019, 建筑碳排放计算标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2019.
- [8] 上海市生态环境局. 上海市生态环境局关于调整本市温室气体排放核算指南相关排放因子数值的通知[Z].2022-02-11.
- [9] GB 55015-2021, 建筑节能与可再生能源利用通用规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2021.
- [10] 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.
- [11] 韩靖,李振文,张俊红,等. 垂直埋管地源热泵空调系统碳排放评估[J].制冷与空调,2022,22(3):98-102.
- [12] ANSI/ASHRAE 62.1-2010, 可接受室内空气质量的通风[S].US-ANSI, 2010.