

# 基于CO<sub>2</sub>热泵的产消型数据中心能效联动优化

王小元<sup>1</sup>, 赵军<sup>1</sup>, 王永真<sup>2,✉</sup>, 许文杰<sup>1</sup>, 钟声远<sup>1</sup>

(1. 天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津, 300350;  
2. 清华大学电机系清华大学能源互联网创新研究院, 北京, 100084)

**摘要:** [目的] 随着数字经济的发展, 数据中心的“规模”将不断扩大, “算力”不断提高, 随之带来的“能耗”及“运行成本”也将不断攀升。为实现数据中心余热的有效利用, 并实现能效的联动优化, 构建了一种基于CO<sub>2</sub>热泵的产消型数据中心能源系统。[方法] 将数据中心视为产消者, 耗电的同时将制冷系统的余热回收, 用于住宅供暖。产消型数据中心能源系统采用空气直接冷却、直膨式地埋管冷却和建筑供暖末端冷却三种方式实现数据中心全年的冷却, 最大程度利用自然冷却, 降低系统电耗。CO<sub>2</sub>作为余热回收用热泵的工作介质, 能够提高系统紧凑性与环境友好性。[结果] 本系统可有效削减冷负荷, 进而在平均占用率较低时, 实现制冷电耗的降低。当平均占用率为0.6时, 与常规房间级风冷空调机组相比, 本系统可降低全年冷负荷108 MWh, 节约电耗制冷电耗167 MWh, 为建筑供热290 MWh, 获得年收益4.23万元。[结论] 本系统可实现数据中心余热回收用于建筑供暖, 实现了数据中心非供暖期余热的有效利用。并通过地源热泵系统实现了数据中心余热与建筑热负荷的协调, 为产消型数据中心的能效联动优化提供了借鉴。

**关键词:** 数据中心; 产消者; 能耗; CO<sub>2</sub>; 地源热泵

中图分类号: TK01; TP308

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)03-0028-10

开放科学(资源服务)二维码:



## Energy Efficiency Linkage Optimization of Production and Consumption Data Center Based on CO<sub>2</sub> Heat Pump

WANG Xiaoyuan<sup>1</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, WANG Yongzhen<sup>2,✉</sup>, XU Wenjie<sup>1</sup>, ZHONG Shengyuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, Ministry of Education of China, Tianjin University, Tianjin 300350; 2. Energy Internet Research Institute, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** [Introduction] With the progress of digital economy, the "scale" and "hashrate" of data centers are constantly expanding, and the "energy consumption" and "operation cost" of data centers will also be constantly rising. In order to realize the effective utilization of waste heat in the data center and realize the linkage optimization of energy efficiency of the data center, this paper constructs a production-consumption type data center energy system based on CO<sub>2</sub> heat pump. [Method] The system took the data center as the producer and consumer, consumed electricity for refrigeration and recycles the heat generation for residential heating. The energy system of production-consumption data center adopted three methods: direct air cooling, direct expansion of buried pipe cooling and terminal cooling of building heating to realize data center cooling. Natural cooling was utilized to the maximum extent to reduce power consumption of the system. Choosing the circulating working medium of the heat pump system for CO<sub>2</sub> waste heat recovery can improve the compactness and environmental friendliness of the system. [Result] The system can effectively reduce the cooling load, and then reduce the refrigeration power consumption when the average occupancy rate is low. When the average occupancy rate is 0.6, the system can reduce the annual cooling load by 108 MWh, save 167 MWh of power consumption, provide heating for the building by 290 MWh, and obtain an annual income of 42,300 yuan. [Conclusion] The system can recycle waste

收稿日期: 2020-07-20 修回日期: 2020-08-23

基金项目: 全国博士后面上科学基金“耦合正逆循环的综合能源系统通用建模及能值分析”(2019M660634); 国家社会科学基金重大项目“面向国家能源安全的智慧能源创新模式与政策协同机制研究”(19ZDA081); 国家自然科学基金青年科学基金项目“产消型数据中心综合能源系统的能量转化机制及可持续评价研究”(52006114)。

heat of data center for building heating and realize effective utilization of waste heat of data center in off-heating period. The coordination between waste heat of data center and building heat load is realized by ground source heat pump system, which provides reference for energy efficiency linkage optimization of production-consumption data center.

**Key words:** data center; prosumer; energy consumption; CO<sub>2</sub>; ground source heat pump

当前,以数字化为代表的科技革命和产业革命,正推动着人类生活方式、生产方式、思维方式的根本性变革。数字作为社会生活的一个关键生产要素,在“云大物移智链”和5G为代表的数字化技术的加速下,正向各个行业全面渗透。如今,海量的数据,将需要感知、存储、加密、传输、调用、计算以及交易。进而,作为数字基础设施的重要载体,数据中心的“规模”将不断扩大、“算力”将不断提高,相应地,数据中心的“能耗”及“运行成本”也将随之不断攀升。2019年全球数据中心能耗已占世界能源使用量的3%以上<sup>[1]</sup>。因此,数据中心的提质增效,是数字经济特征下国家治理的新要求。

数据中心作为一个典型的能源消费大户,需要可靠的电力以及巨量的冷能,以保障数据中心所有IT设备的安全可靠运行。数据中心约40%的电力消耗用于冷却系统<sup>[2]</sup>,因此数据中心制冷能耗的降低有重要的现实意义。为降低数据中心制冷能耗,许多研究人员对数据中心空调散热系统进行优化,许多研究人员对数据中心空调系统展开研究。包括多为暖通视角的气流组织以及维护结构的优化,如陈文辉<sup>[3]</sup>和朱立伟<sup>[4]</sup>等人通过封闭冷热通道和数据中心气流模拟来提高制冷效率;传热视角的高效冷却设备的采用,如刘海潮<sup>[5]</sup>、陶嘉楠<sup>[6]</sup>等人提出的热管微通道以及热管背板等类型的数据中心冷却设备;以及空调系统的热力学动态优化以及液冷技术等<sup>[7-8]</sup>。此外,为节约制冷电耗,许多研究人员采用自然或免费冷源冷却数据中心,部分数据中心采用了自然冷却的方式降低能耗:谷歌在寒冷的比利时建设数据中心;微软将数据中心潜入海底,利用海水冷却;北京冬奥云数据中心地处华北坝上地区,利用自然风冷为数据中心降温<sup>[9]</sup>。我国贵州“数字经济”近几年的快速发展,也离不开其“凉爽、多水”的生态环境和能源资源优势,给数据中心的布置创造了天然的优良条件<sup>[10]</sup>。

但上述研究中,数据中心电压缩制冷通常采用空调机组制冷,电耗较高的同时,冷却工质通常为

R22、R410a等,GWP值分别高达1700和2050,存在潜在的温室效应危害。而自然工质CO<sub>2</sub>作为制冷剂,可有效减小制冷剂对环境的破坏,因此,近年来CO<sub>2</sub>跨临界热泵机组因其对环境无污染、无破坏,系统运行稳定、设备紧凑等优势,作为一种高效、节能、环保的新型技术被广泛地开发和利用<sup>[11]</sup>。目前关于CO<sub>2</sub>热泵的研究包括空气源、水源和土壤源等多种类型,用途也包括供暖、制冷和余热回收等多个方面<sup>[12-15]</sup>。

另一方面,数据中心在消费大量电能的同时,产生的大量废热通常通过电制冷排向外界环境中,未能有效利用且有引起城市热岛的问题。随着数据中心IT设备耐热温度的不断提高,数据中心的余热利用成为可能,这些余热若能得以有效利用,可满足周边建筑供暖需求,还可提高整体系统的能源利用率。如位于天津滨海新区腾讯数据中心的余热回收项目,利用数据机房冷冻水余热二次提温(磁悬浮热泵机组)替代周边楼宇的市政供热(空调冷冻水供水温度15/20℃,可回收的余热高达5.233 MW)。瑞士联邦理工学院提出了采用热水冷却数据中心,余热用于驱动吸附式制冷机,吸附式制冷机反过来为存储服务器提供冷却<sup>[16]</sup>。马什哈德市数据中心采用空气冷却,并将余热回收为邻近的办公大楼供暖<sup>[17]</sup>。

总结起来,现有数据中心余热利用方式有以下两种:机房热通道内的热空气直接利用与采用热泵机组提温后利用,但数据中心产热不稳定,导致余热利用的稳定性有待提高。由于热用户在不同季节的热需求差异较大,非供暖期热需求较低,非供暖期产生的废热难以利用。数据中心的产热随计算量的变化而波动,无法对外提供稳定的热量,而建筑负荷随室外温度呈周期性变化,二者难以相互协调。

因此,产消型数据中心能源系统的构建,不仅需要关注数据中心余热回收的潜力以及某单项技术的应用,更需要从系统的全局角度去研究上游电力供应形式、数据中心中游制冷能效模型、下游余热

供暖技术,以及数据中心冷负荷与供热期建筑热负荷的负荷特性之间的匹配性与耦合性等,必要时还需要前瞻性地考虑数据中心制冷系统的环境友好性。基于以上问题,针对建设在产业园区内有供暖需求的小型数据中心,以降低制冷电耗和数据中心产热利用为目的,设计了基于CO<sub>2</sub>热泵的产消型数据中心能效联动优化。

## 1 产消型数据中心能源系统的架构

在数据中心消耗电能制冷的同时,通过回收利用其大量的中低品位余热,可将数据中心看作是能源的生产者。如此,数据中心就完全符合了产消者(Prosumer, Producer和Consumer的组合)的理念,进而突破了数据中心能效提升的“消费者”局部优化模式。

### 1.1 系统整体设计思路

将建设在产业园区内的小型数据中心为研究对象,以数据中心制冷和高效余热利用为核心,进行产消型数据中心能源系统架构及运行模式设计。

本系统利用地热能的稳定性强、受外界环境影响小的优势构建起数据中心与上游电力供给方和下游热用户之间的联系。非供暖期将数据中心产热通过地源热泵系统储存在土壤中,供暖期将数据中心产热提升温度后用于建筑供暖,并将储存在土壤中的热量用于供暖。通过调节地源热泵的运行状况,协调数据中心不稳定产热与建筑负荷的关系,构成本数据中心产消能源系统。

### 1.2 系统循环工质选择

常规冷却系统由载冷剂将数据中心内IT设备产热带到机柜外,制冷剂将数据中心产热带到数据中心外。本系统将机柜内部载冷剂与数据中心制冷剂合二为一,省去二者换热环节,提升系统效率。为兼具载冷剂和制冷剂作用并减小对环境的破坏,本系统的循环工质选用CO<sub>2</sub>。CO<sub>2</sub>天然存在于自然界中,GWP为1,ODP为0,是一种对环境友好性的物质;具有较好的化学稳定性;单位容积制冷量高,可减小冷却系统体积,提高系统紧凑性;黏度小,提高流速不会带来太大的压降<sup>[18]</sup>。

### 1.3 系统运行模式设计

为降低数据中心制冷能耗,室外温度足够低时,运行模式一,将系统循环工质与室外冷空气

换热,实现自然冷却。为实现将数据中心产热用于建筑供暖,非供暖期利用地源热泵系统将数据中心产热储存在土壤中,有供暖需求时通过地源热泵系统用于建筑供暖;供暖期运行模式三,将数据中心流出的循环工质压缩,提高温度,用于建筑供暖。

图1为系统示意图,分别对应不同运行模式下的系统部件。各模式运行条件与设备如表1所示,循环方式与工况如下详述。

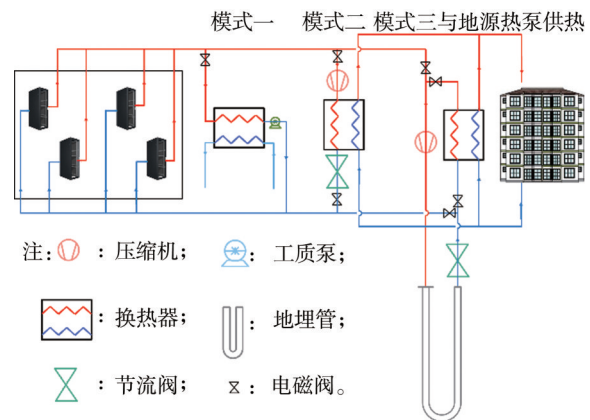


图1 系统示意图

Fig. 1 System diagram

表1 各模式运行条件与设备

Tab. 1 Operating conditions and equipment for each mode

模式	运行条件	运行设备
模式一: 自然冷却	非供暖期: 室外温度低于7℃	空气冷却器
模式二: 直膨式制冷	非供暖期: 室外温度高于7℃	压缩机、地埋管、节流阀
模式三: 数据中心产热供暖	供暖期	压缩机、节流阀、 供暖换热器
地源热泵制热	供暖期	压缩机、地埋管、节流阀

#### 1.3.1 模式一:自然冷却

当环境温度低于7℃(空气与CO<sub>2</sub>的换热温差为5K)时,将蒸发器中排出的12℃的气态CO<sub>2</sub>通过空气冷却器与室外冷空气换热,实现自然冷却,此模式T-S图如图2所示。

#### 1.3.2 模式二:直膨式制冷

当环境温度不足够低时,将土壤作为冷源,将蒸发器中排出的12℃的气态CO<sub>2</sub>在压缩机中压缩到63.59℃,9MPa,通过地埋管与土壤换热,从而在地热井中凝结。然后,液态CO<sub>2</sub>通过膨胀阀减压并

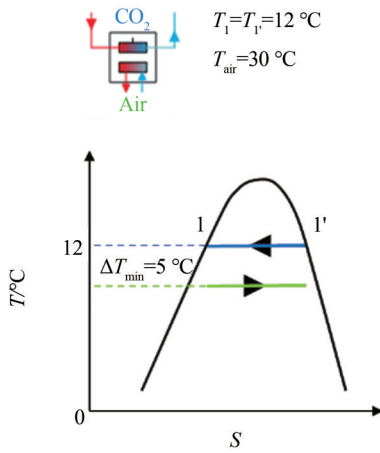


图2 模式一 T-S图

Fig. 2 Mode 1 T-S diagram

返回液体管道。此模式 P-H图如图3所示, 运行参数如表2所示。

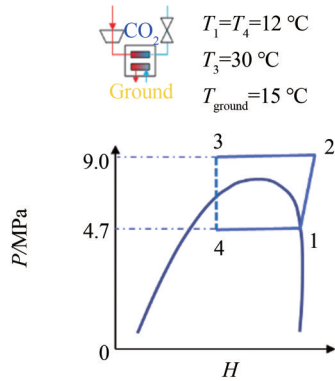


图3 模式二 P-H图

Fig. 3 Mode 2 P-H diagram

表2 模式二运行参数

Tab. 2 Mode 2 operation parameters

位置	温度/°C	压力/MPa	焓值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	12.00	4.73	420.63
2	63.59	9.00	450.90
3	30.00	9.00	276.32
4	12.00	4.73	276.32

### 1.3.3 模式三: 数据中心余热利用

当数据中心附近的建筑物有供暖需求时, 通过热泵冷却数据中心, 并将数据中心产热用于建筑供暖。高温高压的二氧化碳作长距离运输时会产生较高压降, 带来较高的能量损失。拟将二氧化碳直接进入室内换热改为二氧化碳与水进行换热, 由水进入室内供热。相对应运行参数如下, 供热 COP=4.01 制冷 COP=3.01。此模式 P-H图如图4所示, 运

行参数如表3所示。同时, 非供暖期储存在土壤中的热量也通过地源热泵给建筑供热。地源热泵供暖的 P-H图如图5所示, 运行参数如表4所示。

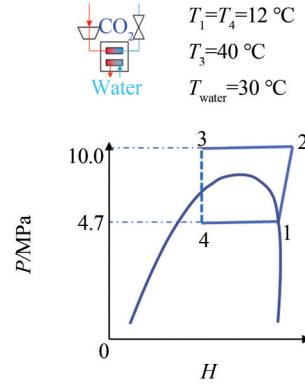


图4 模式三 P-H图

Fig. 4 Mode 3 P-H diagram

表3 模式三运行参数

Tab. 3 Mode 3 operation parameters

位置	温度/°C	压力/MPa	焓值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	12.00	4.73	420.63
2	63.59	10.00	456.37
3	40.00	10.00	313.04
4	12.00	4.73	313.04

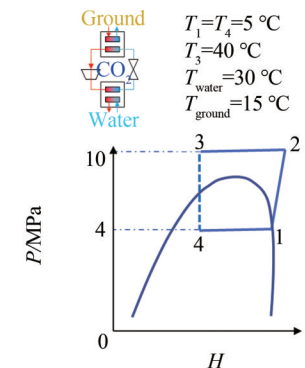


图5 地源热泵供热 P-H图

Fig. 5 Ground source heat pump heating P-H diagram

表4 地源热泵供热运行参数

Tab. 4 Ground source heat pump heating operation parameters

位置	温度/°C	压力/MPa	焓值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
1	5.00	3.97	427.48
2	82.25	10.00	474.96
3	40.00	10.00	313.04
4	5.00	3.97	313.04

## 2 理论设计计算

为分析本系统运行性能, 参考典型数据中心参

数, 制定传统冷却方式与采用本系统的冷却方案进行性能比较。本研究中数据中心占地面积 2 km<sup>2</sup>, 包含 400 个处理器及配套的配电、照明、控制中心等设备, 单台处理器最大功率为 500 W, 数据中心的位置设定为天津。

### 2.1 冷负荷模拟

考虑室内 IT 设备的散热和建筑围护结构的传热两部分, 模拟数据中心冷负荷:

IT 设备冷负荷采用文献 [19] 中的数据中心 IT 设备功耗模型, 根据服务器的实时利用率和网络流量负载实现动态负载仿真。IT 设备冷负荷由服务器  $P_{IT}$ 、网络设备  $P_{server}$ 、配电设备  $P_{dis}$  冷负荷构成:

$$P_{IT} = P_{server} + P_{network} + P_{dis} \quad (1)$$

#### 1) 服务器

$$P_{server}(t) = P_{server, idle} + (P_{server, max} - P_{server, idle})u_{server}(t) \quad (2)$$

$$P_{server, max} = a_0 N_{server} + a_1 \sum_1^{N_{server}} P_{server, rat} + a_2 N_{CPU} S_{CPU} \quad (3)$$

$$P_{server, idle} = a_3 N_{server} + a_4 \sum_1^{N_{server}} P_{server, rat} + a_5 N_{CPU} S_{CPU} \quad (4)$$

式中:  $P_{server, idle}$  为处理器待机功率 (W);  $P_{server, max}$  为处理器占用率为 1 时的功率 (最大功率, W);  $u_{server}$  为处理器占用率;  $a_0 \sim a_6$  为模型参数, 取值参考文献 [19];  $P_{server, rat}$  为额定功率 (W);  $N_{CPU}$  为处理器总数;  $S_{CPU}$  为平均处理器速度 (MHz)。

#### 2) 网络设备

$$P_{network}(t) = C_{network}(t) \left( 2 + 4 \sqrt{\frac{N_{router} - 2}{2N_{link} - 1}} \right) \left( 10 + 7C_{network, rat}^{-0.2653} + 64196C_{network, rat}^{-0.1449} \right) \quad (5)$$

式中:  $N_{router}$  为路由器的数量 (个);  $N_{link}$  为路由器之间的链路数 (条);  $C_{network, rat}$  为额定网络流量负载 (Gbit/s);  $C_{network}$  为小时网络流量负载 (Gbit/s)。

#### 3) 配电设备

$$P_{dis}(t) = (P_{server}(t) + P_{network}(t))\eta_{UPS}(t)\eta_{PDU} \quad (6)$$

$$\eta_{UPS}(t) = a_6 LF_{UPS}^2(t) + a_7 LF_{UPS}(t) + a_8 \quad (7)$$

$$LF_{UPS}(t) = \frac{P_{server}(t) + P_{network}(t)}{P_{UPS, rat}} \quad (8)$$

式中:  $P_{UPS, rat}$  为 UPS 的额定功率 (W);  $\eta_{PDU}$  为 PDU 的效率。

所用各项参数如表 5 表示。

表 5 IT 设备的规格和经验系数

Tab. 5 Specifications and coefficients of IT equipment

部件	参数	数值
服务器	额定功率, $P_{server, rat}$	500 W
	处理器平均速度 $S_{CPU}$	2.5 GHz
	处理器总数, $N_{CPU}$	800
	每小时的利用率, $u_{server}$	$N[\mu, \sigma]$
	$a_0 = -5.607 \text{ W}, a_1 = 0.2101 \text{ W/W}$ $a_3 = -5.679 \text{ W}, a_4 = 0.1123 \text{ W/W}$	$a_2 = 2.499 \times 10^{-3} \text{ W/MHz}$ $a_5 = -1.593 \times 10^{-4} \text{ W/MHz}$
网络设备	路由器的数量, $N_{router}$	42
	路由器之间的链路数, $N_{link}$	60
	额定网络流量负载, $C_{network, rat}$ 每小时网络流量负载, $C_{network}$	100 Gbit/s $N[28.74, 21.23] \text{ Gbit/s}$
配电设备	UPS 额定功率, $P_{UPS, rat}$	320 MW
	PDU 效率, $\eta_{PDU}$	0.97
	$a_6 = -0.3610; a_7 = 0.4969$ $a_8 = 0.8161$	

建筑冷负荷模拟所用气象参数为天津的典型年参数, 其中环境温度、风速等数据来源于 DeST [20]。

### 2.2 能耗计算

对两冷却方案能耗模拟, 得到其全年运行总能耗。本系统耗电设备包括风机、压缩机、工质泵等, 能耗计算如下:

1) 风机、工质泵耗功: 由实际流量查性能曲线确定。

2) 压缩机耗功:  $P=Q/(COP \cdot \eta)$ , 其中  $\eta$  为压缩机效率,  $Q$  为负荷值, 直膨式地理管冷却与数据中心余热供热时  $Q$  为数据中心冷负荷; 地源热泵制冷时  $Q$  为建筑热负荷。

### 2.3 数据中心机架末端冷却方案的布置设计

结合以上数据中心参数, 分别设计传统数据中心制冷方式与本系统作为两个制冷方案。

冷却方案一采用房间级冷却、采用多台循环工质为 R22 的 LF-50LW/T 风冷空调机组制冷, 无余热利用, 不含 CO<sub>2</sub> 热泵系统。为保证局部热点的有效冷却, 房间级冷却的供冷量冗余通常较高设置, 将数据中心内室温控制在 18℃ 左右 [21], 方案一冷负荷为 IT 设备散热与建筑负荷叠加。

方案二中采用机柜级冷却采用上述系统冷却, 将服务器和蒸发器封闭在机柜内部, 机柜内与房间的热交换可以忽略不计。机柜内部采用恒温控制, 温度控制在 26℃ 左右, 冷负荷为机柜内部的 IT 设备散热。

## 2.4 初投资与收益计算

### 1) 不同冷却方案的初投资

由于方案一采用房间级冷却, 房间内温度受室外温度影响, 设计负荷为IT设备最大负荷与建筑最大负荷的叠加, 选用单台制冷能力5 kW, 单价9 850元的空调制冷机组, 数据中心最大产热量200 kW与建筑最高冷负荷83 kW叠加, 得到最高冷负荷为: 283 kW, 由于其叠加建筑负荷后最大负荷较高, 因此初投资较高。而方案二仅考虑机柜内处理器产热, 设计负荷为200 kW。

参考现有市场<sup>[22]</sup>, 冷却方案二设备选型与报价如表6所示。

表6 设备选型与报价

Tab. 6 Equipment selection and quotation

设备名称	型号	价格 /万元	设备 台数	设备最大 功率/W
翅片管换热器	定制	8.80	80	5 000
风机	LH-110-30W	6.19	80	30
工质泵	TL-B10-B24-1208	0.66	40	31.2
压缩机	DX-1.5/150	16.30	2	75 000
节流阀	JKV-20D	1.29	2	200 000
地埋管	16×20×62	19.91	40	6 200

如不考虑施工成本, 方案一采用空调机组, 初投资56.14万元, 根据表2数据, 得方案二总初投资为: 53.16万元。由于方案一设计负荷较高, 其初投资也偏高。

### 2) 方案二冬季建筑供暖面积计算

本系统利用地热能的热稳定性强、受外界环境影响小的优势构建起了数据中心与上游电力供给方、与下游热用户之间的联系, 通过地源热泵系统协调了数据中心产热与建筑热负荷的关系, 实现了数据中心不稳定的低温产热的高效利用。供暖期数据中心余热与地源热泵同时为建筑供暖, 优先保证数据中心制冷和建筑供热需求, 通过调节地源热泵制热量协调三者关系。

通过对数据中心产热量的计算得到数据中心制热能力, 通过对典型年建筑热负荷模拟得到建筑的全年热负荷。为保证土壤温度恒定, 保持系统在土壤中吸放热数值相等, 根据系统在非供暖期的储热量与数据中心供暖期的余热量的模拟得到本系统制热能力, 依据供暖期建筑

总负荷与系统制热能力匹配的原则选取供热面积。为保证冬季建筑供暖安全, 根据供暖期最低温度得到建筑最大热负荷, 并保证其低于地埋管最大制热能力。

## 3 结果与讨论

分别模拟前述两种冷却方案下数据中心的运行情况, 计算其能耗、电耗与年运行收益, 分析两方案性能。

### 3.1 冷负荷对比

结合前文所述冷负荷计算方法, 对两种方案的冷负荷进行计算并比较。

#### 1) 方案一、二冷负荷对比

处理器占用率在0.8左右时, 方案一、二冷负荷如图6, 由于方案一的负荷受建筑负荷影响, 随室外温度呈季节性波动, 变化范围较大, 最高可达120 kW, 而方案二由于采用机柜级冷却, 将机柜封闭, 不受外界负荷影响, 波动范围较小, 最高负荷仅为45 kW。

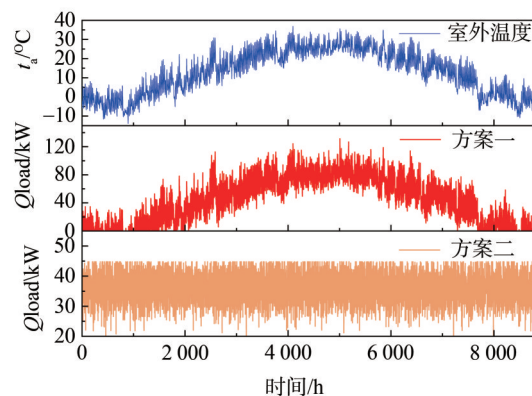


图6 逐时冷负荷

Fig. 6 Hourly cooling load

#### 2) 不同平均占用率全年冷负荷对比

方案一、二的全年最大负荷随平均占用率变化情况如图7, 由于方案二采用机柜级冷却, 不叠加建筑负荷, 其全年最大负荷偏低。在不同平均占用率下均低于方案一70 kW~80 kW。

方案一、二的全年冷负荷随平均占用率变化情况如图8, 方案一年冷负荷可达390 MWh, 而方案二最高年负荷仅330 MWh。平均占用率为0.3时, 方案二比方案一年冷负荷低40 MWh, 随着平均占用率的升高, 两方案冷负荷差值也升高, 平均占用率

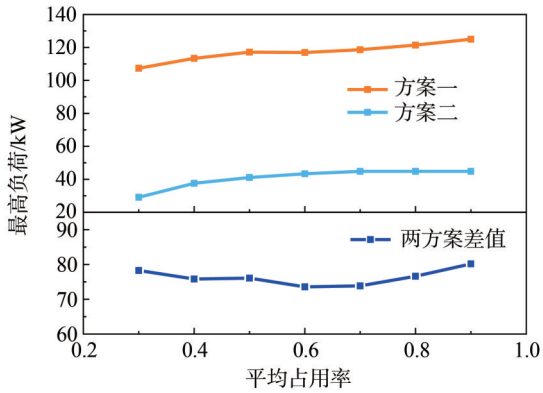


图7 不同占用率下两方案最大负荷

Fig. 7 The maximum load of the two schemes under different occupancy rates

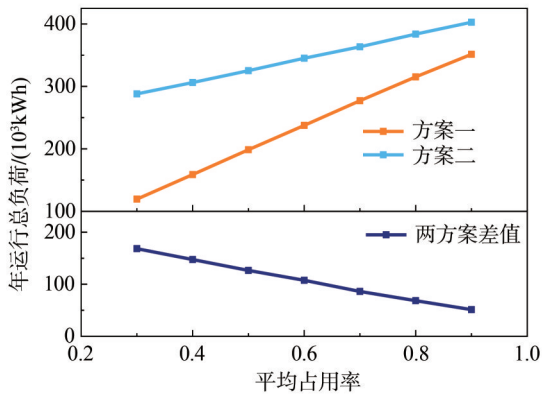


图8 不同占用率下两方案全年冷负荷

Fig. 8 The annual cooling load of the two schemes under different occupancy rates

为0.9时，方案二的全年冷负荷低于方案一170 MWh。

### 3.2 年制冷电耗与年净收益对比

对两方案在不同平均占用率的情况下的运行电耗与净收益进行模拟，其中方案二的优化逻辑如图9，分别以最低年制冷电耗和最高年净收益为优化目标进行优化，首先以天为单位，通过有无供暖需求和室外空气温度判断系统运行模式；再对全年运行能耗与供热量和运行收益进行模拟；最后通过改变自然冷却模式的启动温度确定最优运行模式。

#### 1) 以最低年制冷电耗为目标

两方案的年制冷电耗和PUE数值（以最低年最低制冷电耗为目标运行）如图10~图11所示。

由图10~图11可知，由于不同冷却形式的负荷大致相近，且方案二供暖期需提升数据中心余热温度用于供暖，因此在占用率高达0.8、0.9时方案一、二年制冷电耗基本相同，相差  $20 \times 10^3$  kWh 以内，

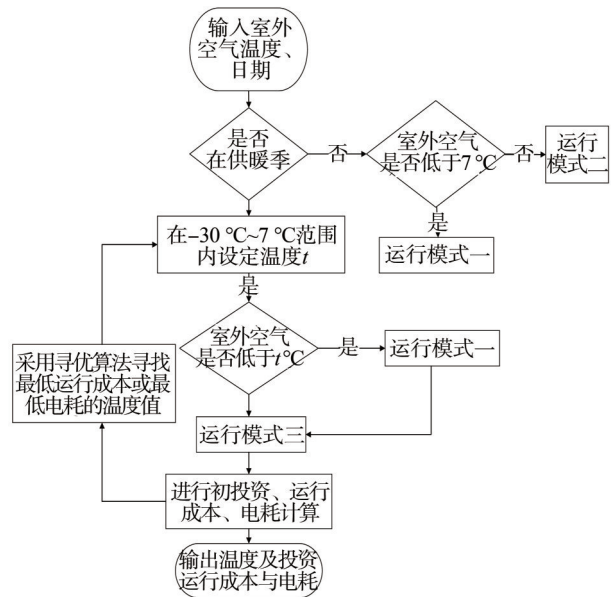


图9 方案二优化逻辑

Fig. 9 Scheme two optimization logic

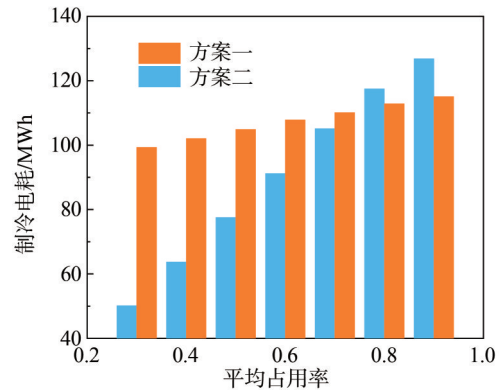


图10 两方案不同平均占用率的年制冷电耗

Fig. 10 The refrigeration power consumption of the two schemes with different average occupancy rate

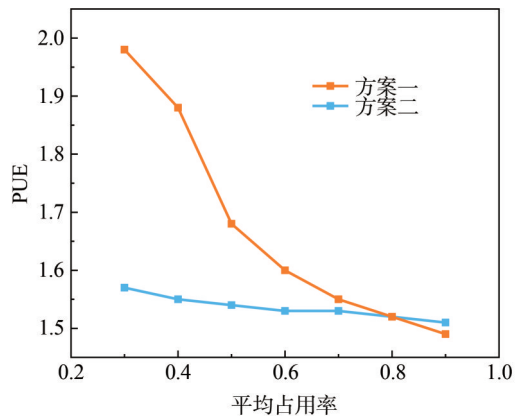


图11 两方案不同平均占用率的PUE

Fig. 11 PUE of the two schemes with different average occupancy rate

PUE数值也均在1.5左右。而当占用率低于0.7时,由于机柜级冷却与负荷分配在低利用率时对冷负荷削减效果较好,方案二年制冷电耗明显低于方案一,PUE值也明显小于方案一;在平均占用率为0.7时,二者相差5 MWh,方案一、二的PUE分别为1.55、1.53,随平均占用率的降低,方案二降低电耗效果更佳,在平均占用率为0.3时,可节约电耗49.15 MWh,方案一、二的PUE分别为1.98、1.57。

在上述两方案中,两方案的PUE数值较高,均高于1.48,除产业园区内数据中心可采用的自然冷却方式有限外,还由于本系统在实现数据中心制冷的同时兼具建筑供暖作用。方案二系统各项能耗如图12所示,可知本系统承担了耗电量2.3倍的冷负荷以及耗电量2.9倍的建筑供热量,相较于普通电采暖,本系统实现了电能的高效利用,在节约高品质能源方面具有重要的意义。

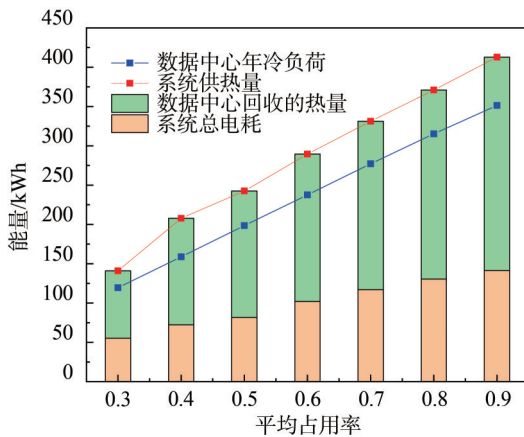


图12 方案二系统各项能耗图

Fig. 12 The energy consumption of project two system

## 2) 以最高年净收益为目标

方案二通过为建筑供暖获得收益,而方案一需支付制冷设备耗电引起的费用。二者年净收益(方案二以最高年系统净收益为目标运行)如图13所示。

可知:方案一、二的收益与费用均随数据中心平均占用率升高而增加。方案一在平均占用率0.3~0.9范围内需支付4万元~5.5万元不等的电费。方案二收益随平均占用率的升高由1万元增加至6万元,这是由于数据中心平均占用率越高,负荷也越高,所需制冷电耗和产热均随之增加。以平均利用率0.8为例,方案二最高年净收益5.02万元,而方案

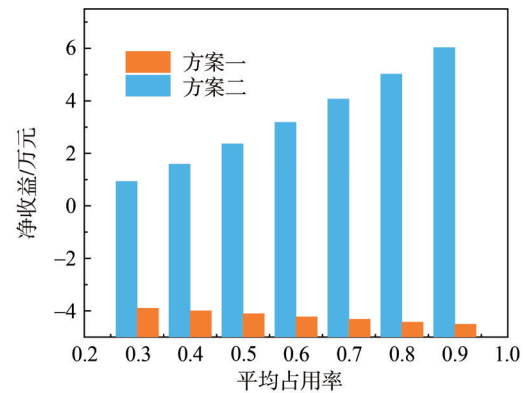


图13 两方案不同平均占用率的净收益

Fig. 13 The net benefit of the two schemes with different average occupancy rates The maximum load of the two schemes under different occupancy rates

一每年需支付4.51万元电费。因此,方案二经济性远好于方案一。

## 4 结论

本文设计了一种基于CO<sub>2</sub>热泵的产消型数据中心能效联动优化的系统,根据室外温度和有无供暖需求采用三种冷却方式切换实现数据中心冷却。既满足了数据中心的制冷需求,又实现了数据中心余热回收用于供暖。

1) 本系统通过自然冷却、计算负荷分配与机柜级冷却,最高可降低数据中心年运行冷负荷170 MWh,由于采用机柜级冷却,不叠加建筑负荷,方案二可降低最高负荷70 kW~80 kW。

2) 本系统利用地热能的热稳定性强、受外界环境影响小的优势构建起了数据中心与上游电力供给方和下游热用户之间的联系,通过地源热泵系统协调了数据中心产热与建筑热负荷的关系,实现了数据中心不稳定的低温产热的高效利用。

3) 本系统可承担耗电量2.3倍的冷负荷以及耗电量2.9倍的建筑供热量,相较于普通电采暖,本系统实现了电能的高效利用,在节约高品质能源方面具有重要的意义。

4) 本系统通过供暖期建筑供暖获得收益,除支付系统耗电费用以外,可获得1万元~6万元不等的经济收益,在占用率为0.9时,可获得6万元年运行收益。

本系统可广泛应用于数据中心建设与改造中,也可与其他冷却方式结合,因地制宜制定最优数据



中心冷却方案。

本文中数据中心是结合实际典型数据中心参数设置的,无实际数据中心作为研究对象,之后的研究可根据实际数据中心参数进行设计,更具有实际意义。本文仅针对天津地区的气象参数进行系统设计,往后的工作可以针对其他地区不同的气象条件和地理位置,基于能源互联网及综合能源系统的方法论,对不同规模的数据中心的余热回收及能效联动进行优化设计<sup>[10, 23-24]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 王永真,赵伟,高峰. 打造产消型数据中心综合能源模式 [N]. 中国电力报,2020-05-29:4.  
WANG Y Z, ZHAO W, GAO F. Building a production-consumption data center comprehensive energy model [N]. China Power News, 2020-05-29:4.
- [2] 刁兴玲. 《数据中心白皮书》发布提升运维水平成重点 [J]. 通信世界, 2018(28):11.  
DIAO X L. The release of white paper on data center gives priority to improving operation and maintenance level [J]. Communications World, 2018(28):11.
- [3] 陈文辉. 热通道封闭在数据中心应用分析 [J]. 洁净与空调技术, 2020(1):115-116.  
CHEN W H. Application analysis of thermal channel closure in data centers [J]. Cleaning and Air Conditioning Technology, 2020(1):115-116.
- [4] 朱立伟. 数据中心机房精密空调温度及气流数值模拟 [J]. 建筑科技, 2019, 3(2):58-60.  
ZHU L W. Numerical simulation of temperature and airflow of precision air conditioning in data center machine room [J]. Building Science and Technology, 2019, 3(2):58-60.
- [5] 刘海潮, 邵双全, 张海南, 等. 回路热管微通道换热器蒸发冷却实验 [J]. 化工学报, 2018, 69(增刊2):161-166.  
LIU H C, SHAO S Q, ZHANG H N, et al. Experimental study on evaporative cooling of micro-channel heat exchanger with loop heat pipe [J]. Journal of Chemical Industry, 2018, 69 (Supp. 2):161-166.
- [6] 陶嘉楠. 基于热管背板的数据中心机柜冷却系统研究 [D]. 长沙:湖南大学, 2018.  
TAO J N. Research on data center cabinet cooling system based on heat pipe backplane [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [7] 谷丽君. 基于热感知的数据中心能耗优化策略研究 [D]. 北京:华北电力大学(北京), 2019.  
GU L J. Research on data center energy consumption optimization strategy based on thermal perception [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019.
- [8] 侯晓雯, 杨培艳, 刘天伟. 液冷服务器在数据中心的研究与应用 [J]. 信息通信, 2019(9):48-51.  
HOU X W, YANG P Y, LIU T W. Research and application of liquid-cooled server in data center [J]. Information Communications, 2019(9):48-51.
- [9] 王继业, 周碧玉, 刘万涛, 等. 数据中心跨层能效优化研究进展和发展趋势 [J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(1):1-24.  
WANG J Y, ZHOU B Y, LIU W T, et al. Research progress and development trend of interlayer energy efficiency optimization in data centers [J]. Scientia Sinica: Information Science, 2020, 50(1):1-24.
- [10] 王永真, 赵伟, 张靖. 能源互联网下的数据中心能源供应 [J]. 能源, 2020(5):61-65.  
WANG Y Z, ZHAO W, ZHANG J. Energy supply of data centers under the energy internet [J]. Energy, 2020(5):61-65.
- [11] 李林凤, 王明, 马瑞军, 等. 高效节能环保跨临界CO<sub>2</sub>热泵技术 [J]. 科技与创新, 2020(3):80-81+83.  
LI L F, WANG M, MA R J, et al. High efficiency, energy saving and environmental protection cross-critical CO<sub>2</sub> heat pump technology [J]. Science and Technology and Innovation, 2020 (3):80-81+83.
- [12] 李椿, 王志华, 王洋浩, 等. CO<sub>2</sub>热泵研究现状及展望 [J]. 制冷学报, 2018, 39(5):1-9.  
LI C, WANG Z H, WANG F H, et al. The status and prospects of the CO<sub>2</sub> heat pump [J]. Journal of refrigeration, 2018, 39(5) 6:1-9.
- [13] 邓帅. 太阳能辅助二氧化碳热泵性能和应用研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2013, 23-25.  
DENG S. Research on performance and application of solar-assisted CO<sub>2</sub> heat pump [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013, 23-25.
- [14] 陈子丹, 罗会龙, 杜培俭, 等. 供暖用CO<sub>2</sub>空气源热泵变频运行性能研究 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(3):219-225.  
CHEN Z D, LUO H L, DU P J, et al. Study on variable frequency performance of CO<sub>2</sub> air source heat pump for heating [J]. Acta Solar Energy, 2020, 41(3):219-225.
- [15] 梁俊翠. 水源二氧化碳热泵焓分析研究 [J]. 科学技术创新, 2018(8):28-29.  
LIANG J C. Study on entropy analysis of water source CO<sub>2</sub> heat pump [J]. Science and Technology Innovation, 2018(8):28-29.
- [16] IBM. Direct use of waste heat to minimize carbon-dioxide emissions [EB/OL]. (2015-04-03)[2020-07-20]. [https://www.zurich.ibm.com/st/energy\\_efficiency/zeroemission.html](https://www.zurich.ibm.com/st/energy_efficiency/zeroemission.html).
- [17] MAHDI D D, SAJAD V N. Thermoeconomic and environmental feasibility of waste heat recovery of a data center using air source heat pump [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 219(1):117-126.
- [18] 彭英欣. CO<sub>2</sub>跨临界循环直膨式地源热泵系统仿真研究 [D]. 保定:华北电力大学, 2014, 36-37.  
PENG Y X. Simulation research on CO<sub>2</sub> transcritical cycle di-

- rect expansion ground source heat pump system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014, 36-37.
- [19] 张昊唯, 王胜伟, 庄超群, 等. 一种简化的能源系统实时动态仿真数据中心信息技术(IT)设备功耗模型[J]. 应用能量, 2018, 222(1): 329-342.
- ZHANG H W, WANG S W, ZHUANG C Q, et al. A simplified power consumption model of information technology (IT) equipment in data centers for energy system real-time dynamic simulation [J]. Applied Energy, 2018, 222(1): 329-342.
- [20] 杨丹, 夏佳, 唐伟, 等. 建筑仿真集成工具包第1部分: 基本原理[J]. 建筑模拟, 2008, 1(2): 95-110.
- YANG D, XIA J, TANG W, et al. Dest — an integrated building simulation toolkit part I: fundamentals [J]. Building Simulation, 2008, 1(2): 95-110.
- [21] KHALAJ A H, SAMAN K. 风冷和水冷数据中心从芯片到冷却系统的高效热管理研究[J]. 应用能量, 2017, 205(1): 1165-1188.
- KHALAJ A H, HALGAMUGE S K K. A review on efficient thermal management of air-cooled and liquid-cooled data centers: from chip to the cooling system [J]. Applied Energy, 2017, 205(1): 1165-1188.
- [22] TOPSFLO. Cost of equipment: dublin [EB/OL]. (2020-07-20) [2020-07-20]. <http://www.topsflo.com/brushless-dc-pump/tl-b10-brushless-dc-pump.html#Specifications>.
- [23] 冯成, 王毅, 陈启鑫, 等. 能源互联网下的数据中心能量管理综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 1-9.
- FENG C, WANG Y, CHEN Q X, et al. Overview of data center energy management under the energy internet [J]. Electric power automation equipment, 2020, 40(7): 1-9.
- [24] 印佳敏, 陈泽韩. 天然气分布式能源系统在大型数据中心的应用研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(2): 52-56.
- YIN J M, CHEN Z H. Application research of natural gas distributed energy system in large data center [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(2): 52-56.

#### 作者简介:



王小元

#### 王小元

1997-, 女, 吉林长春人, 天津大学硕士研究生, 主要从事数据中心能效优化及中低品位热能高效利用的研究 (e-mail) 18222691429@163.com。

#### 赵军

1964-, 男, 天津人, 天津大学教授, 主要从事中低品位热能高效利用以及综合能源系统的研究 (e-mail) zhaojun@tju.edu.cn。

#### 王永真 (通信作者)

1988-, 男, 陕西富平人, 清华大学能源互联网创新研究院助理研究员, 清华大学电机系博士后, 天津大学热能系博士, 主要从事能源互联网与数据中心能效优化的研究 (e-mail) wyz80hou@tsinghua.edu.cn。

#### 许文杰

1993-, 男, 江苏无锡人, 天津大学博士, 主要从事地热能高效利用与制冷热泵技术的相关研究 (e-mail) wenjiex@tju.edu.cn。

#### 钟声远

1992-, 男, 河北保定人, 天津大学博士研究生, 从事信息物理融合系统方面的研究 (e-mail) zhongshengyuan@tju.edu.cn。

#### 项目简介:

**项目名称** 产消型数据中心综合能源系统的能量转化机制及可持续评价研究 (52006114)

**承担单位** 清华大学

**项目概述** 作为新型基础设施的重要载体, 数据中心的能耗问题将随着数字经济的快速发展而日益突出。基于此, 本项目从产消者视角, 基于有机朗肯循环(正循环)、压缩式热泵循环(逆循环)在中低品位热能热功/功热转换上的潜力, 提出产消型数据中心正逆循环综合能源系统的新模式, 研究产消型数据中心综合能源系统的能量转化机制及热电解耦方法。进而, 针对综合能源系统正逆循环热性能与工质物性之间非线性耦合关系及显式表征的系统建模需求, 提出基于循环拆分的正逆循环热性能计算经验关联式构建方法, 研究基于线性化能量枢纽的产消型数据中心正逆循环综合能源系统的通用建模方法; 针对数据中心综合能源系统多层级变量中工质种类的离散化问题及系统异质能流的统一量化问题, 应用多目标优化及能值分析理论, 开展产消型数据中心正逆循环综合能源系统“工质-循环-设备-系统”的同步优化及系统可持续评价。项目成果可对数据中心能源系统的能效提升及可持续评价提供科学支撑。

(责任编辑 李辉)