

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-875-09

首钢园区数据中心空调系统设计 及节能经济效益分析

颜晓光

(北京首钢国际工程技术有限公司 北京 100041)

【摘要】 主要介绍了首钢园区数据中心空调冷热源方案的设计, 为节省运行能耗, 采用了冷水机组、板式换热器和冷却塔组合的形式, 可实现完全压缩制冷、部分自然冷却、完全自然冷却的运行模式; 为利用北京市峰谷电价政策, 设置水蓄冷系统, 夜间谷段蓄冷, 日间尖峰和高峰时段释冷, 降低运行费用; 设置水源热泵回收机房余热, 为机房新风处理系统及办公用房空调提供冷热源, 与采用市政热网供热相比可降低初投资和运行费用。

【关键词】 数据中心; 冷水机组; 冷却塔; 水蓄冷; 余热回收; 水源热泵

中图分类号 TU834 文献标识码 B

Air Conditioning System Design and Energy-saving Benefit Analysis of Data Center in Shougang Park

Yan Xiaoguang

(Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd, Beijing, 100041)

【Abstract】 This article mainly introduces the design of the air conditioning system in the data center of Shougang Park. In order to save operating energy consumption, it adopts the form of a combination of chillers, plate heat exchangers and cooling towers, which can realize the operation of complete compression refrigeration, partial natural cooling, and complete natural cooling; In order to take advantage of Beijing's peak and valley electricity price policy, set up a cold water storage system to store cold at night and release cold during peak and peak hours to reduce operating costs; Setting up a water source heat pump to recover the waste heat of the computer room provides a cold and heat source for the fresh air treatment system in the computer room and the air conditioning in the office room. Compared with the municipal heating network, the initial investment and operating costs can be reduced.

【Keywords】 data center; refrigeration unit; cooling tower; water cool storage; waste heat recovery; water source heat pump

作者(通讯作者)简介: 颜晓光(1986.01-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, E-mail: yxg0101@163.com

收稿日期: 2021-03-01

0 前言

数据中心全年运行, 冷却系统耗能较大, 冷却方案的设置一直是行业研究的重点, 对于大型数据中心, 制冷设备普遍采用冷水机组+板式换热器+冷却塔的组合, 根据气候条件, 通过调节管路阀门实

现完全压缩制冷、部分自然冷却、完全自然冷却的运行模式(见表1), 充分利用自然冷却, 降低系统运行能耗及费用。数据中心余热量大, 通过设置热回收系统回收其热量用于冬季供暖, 具有较大的经济效益和社会效益。

表 1 不同运行说明

Table 1 Description of different operation modes of air conditioner

序号	运行模式	运行模式说明
1	完全压缩制冷	冷水机组和冷却塔运行，空调冷冻水回水经冷水机组后温度降至供水温度
2	部分自然冷却	冷水机组和冷却塔、板式换热器运行，空调冷冻水先经板式换热器预冷，再经冷水机组后温度降至供水温度，减少冷水机组的负荷
3	完全自然冷却	冷水机组不运行，冷却塔、板式换热器运行，空调冷冻水经板式换热器被冷却水冷却后达到空调冷冻水供水温度

本文以首钢园区数据中心为例，介绍了其空调冷热源方案，其采用冷却塔间接供冷系统，并设置了调峰蓄冷水罐及余热回收系统。以选定的空调冷热源方案为研究对象，计算分析了其全年能耗情况，并根据当前分阶段电价计算分析了其水蓄冷系统的经济效益，对比分析了采用余热回收系统和市政热网供热方案的初投资和运行费用。

1 空调负荷及系统的划分

本项目建设地点为北京首钢园区内，工程承担着冬奥会核心技术系统运行、测试、安装和指挥等功能，是北京冬奥会信息系统的中枢神经。项目总建筑面积约13473.40m²，地下1层，主要为配电室

和制冷机房及钢瓶间等；地上2层，北侧地上1层2层均为数据机房，南侧地上1层、2层为PNC、TER机房、运营商接入间、办公会议室等，机架总数量1852台，机房级别为A级。

数据机房采用地板下送风+封闭冷通道的形式，封闭冷通道内地板送风口开孔率不小于60%，并配风口调节阀，调节送风量。为满足数据机房与走道5Pa正压要求，数据机房设置新风系统，新风机组设置在各空调机房；新风由室外引入并经净化处理（板式G4+微静电），夏季新风处理至室内空调状态点等焓值后送入空调机房，冬季新风处理至高于室内空调露点温度1℃后送入空调机房。各场所室内设计参数如表2所示。

表 2 数据中心室内设计参数

Table 2 Indoor environment design parameters of data center

房间名称	夏 季		冬 季		新风量	备注
	温度 (°C)	相对湿度 (%)	温度 (°C)	相对湿度 (%)		
数据机房	18~27 (冷通道)	40~55 (冷通道)	18~27 (冷通道)	40~55 (冷通道)	1次/h	全年
运营商接入间	24±2	55	24±2	55	1次/h	全年
PNC、TER 机房	24±2	55	24±2	55	1次/h	全年
UPS 室	26	60	26	—	—	—
电池室	28	—	20	—	—	—
TOC、BTF	26	60	20	—	30m ³ /h·人	—
消防控制室	26	60	18	—	30m ³ /h·人	—
办公会议	26	60	20	—	30m ³ /h·人	—

表3为数据中心空调冷热负荷计算表，工艺性空调为数据机房、电力机房、变配电室等全年供冷，工艺空调冷负荷中有9220kW由集中水冷空调系统承担，剩余515kW由分散式风冷精密空调承担。机

房新风及部分舒适性空调的冷/热负荷由水源热泵机组承担，水源热泵机组供热时回收数据机房的余热，共承担冷负荷600kW，热负荷690kW，其余由多联式空调承担。

表3 数据中心空调冷热负荷统计表

Table 3 Cooling and heating load statistics of air conditioning in data center

分区	工艺空调冷负荷 (kW)	机房新风冷负 荷 (kW)	机房新风热负荷 (kW)	舒适空调冷负 荷 (kW)	舒适空调热负荷 (kW)
一期数据中心	7185	208	290	300	240
二期数据中心	2550	80	110	140	100
总计	9735	288	400	440	340

2 制冷空调方案

2.1 工艺空调系统

为充分利用自然冷源，降低全年运行能耗，本数据中心工艺空调冷源采用大型数据中心常用的冷却塔+板式换热器+冷水机组的组合形式，该种组合形式在室外温度较高时，完全由制冷机组冷却空调回水（完全机械制冷），可发挥水冷机组性能系数高的优势；当室外温度较低时，可先利用冷却塔预冷空调冷水回水再经制冷机组制冷（部分自然冷却），节省部分机组能耗；当室外温度较低时，可停止冷水机组，完全利用冷却塔冷却空调冷水回水至供水温度（完全自然冷却），节省能耗。

由于数据机房空调冷负荷以显冷负荷为主，约

占总冷负荷的95%；同时，为延长全年自然冷却时间，减少制冷机组运行时间，工艺空调冷冻水供水温度应适当提高。本工艺空调冷冻水设计供回水温度为12/18℃，系统通过阀门的切换可实现完全自然冷却、部分自然冷却、完全机械制冷的运行工况，三种工况切换由自控系统完成，不同工况的运行条件见表4。冷却塔设计除满足夏季空调需要外还须满足表4中完全自然冷却时的需要，其中运行时间按照北京市全年湿球温度分布计算冷水机组选用4台变频离心机其中1台为备用且为双工况冷水机组，用于水蓄冷系统。板式换热器换热温差1.5℃，并预留10%的裕量。

表4 工艺空调不同运行工况的条件

Table 4 Different operating conditions of process air conditioner

冷水供/回 水温度(℃)	全压缩制冷			部分自然冷却			完全自然冷却		
	冷却塔出水 温度(℃)	室外湿球 温度(℃)	时长 (h)	冷却塔出水 温度(℃)	室外湿球 温度(℃)	时长 (h)	冷却塔出水 温度(℃)	室外湿球 温度(℃)	时长 (h)
12/18	>16.5	>12	4780	$10.5 < t \leq 16.5$	$5.0 < t_{sw} < 12$	1330	≤ 10.5	≤ 5.0	2650

冷冻水系统采用两管制二级泵系统，一级泵与冷水机组一一对应，一级泵、二级泵均采用变频水泵；冷却塔、冷却水泵、冷水机组及板式换热器一一对应，冷却水泵采用变频泵。冷冻水管网及冷却水管网均布置为环状，设置必要的阀门以保证单点故障时系统正常运行，详见图1及表6。

2.2 水蓄冷系统

为充分利用北京市峰谷电价政策并提高备用主机的利用率，本工程设置调峰水蓄冷系统，在夜间谷电时段（23:00~7:00）利用备用主机进行蓄冷，在日间峰值（尖峰）电价时段（11:00~13:00）进行

释冷，并始终保留15min应急供冷量。设计调峰蓄冷量为6500RTh，应急蓄冷量为700RTh，总蓄冷量为7200RTh。在冷水机组不运行的情况下，调峰蓄冷量可满足数据中心满负荷运行工况下约2.3h的运行时间。

蓄冷冷源由备用冷水机组提供，空调工况制冷量980RT，供回水温度12/18℃；蓄冷工况制冷量800RT，供回水温度4/12℃。为保证冷水机组的安全运行，夜间蓄冷过程分为两个循环，第一循环将蓄冷罐内水温由18℃降至12℃，第二循环将蓄冷罐内水温由12℃降至4℃。共设置3座外径8m、高15m

的蓄冷水罐，总有效容积为1800m³。

蓄冷水罐释冷时，蓄冷罐内低温冷水与冷冻水回水混合，提供12℃的冷冻水供水。当系统处于部分自然冷却模式时，若冷水机组承担负荷较小无法开机时，可由蓄冷系统与冷却塔进行联合供冷，有效延长完全自然冷却供冷时间。冬季完全自然冷却工况时，将蓄冷温度调节至12℃，满足15min应急供冷所需冷量。

2.3 舒适性空调及热回收系统

为解决机房新风及舒适性空调的冷/热负荷，设置水源热泵机组2台，对应配备2台冷却塔。夏季供冷时冷却塔和水源热泵机组工作，冷冻水供回水温度为7/12℃；冬季供热时，通过水源热泵机组回

收机房余热，热水供回水温度60/50℃。单台水源热泵机组制热量满足60%设计热负荷的需要，舒适性空调夜间低负荷时仅开启1台水源热泵机组。

冷冻水（热水）采用一级泵变频变流量系统，并采用共用集管连接方式，供回水总管之间设置旁电动压差旁通调节阀，设计流量为单台机组允许最小流量。

2.4 主要设备配置及工艺流程

工艺空调冷源设备按N+1模式设置，以保证A级电子信息机房的冗余量要求。主要设备选型参数如表5所示。图1为系统流程图，表6为不同运行模式时阀门的状态。

表 5 主要设备性能参数

Table 5 Main equipment performance parameters

序号	设备编号	设备名称	规格参数	数量	备注
1	L-01	离心式制冷机	制冷量：980RT，供回水温度：12/18℃， 额定工况 COP：6.27，变频	3 台	
2	L-02	双工况离心式制冷机	制冷工况：980RT，供回水温度 12/18℃； 蓄冷工况：800RT	1 台	备用兼蓄冷
3	BH-01	板式换热器	换热温差 1.5℃设计，阻力≤40kPa	4 台	3 用 1 备
4	CT-01	冷却塔	流量：700 m ³ /h，进出水温度 15/10.5℃（湿球温度 5℃），进出水温度 37/32℃（湿球温度 28℃），功 率：5×5.5kW	4 台	3 用 1 备
5	LQ-01	冷却水泵	流量：700m ³ /h，扬程：30m，功率：90kW，变频	4 台	3 用 1 备
6	LD1-01	一级冷冻水泵	流量：500m ³ /h，扬程:35m，功率：75kW，变频	4 台	3 用 1 备
7	LD2-01	二级冷冻水泵	流量：500m ³ /h，扬程:25m，功率：55kW，变频	4 台	3 用 1 备
8	RB-01	水源热泵机组	制热量：450kW，制冷量：360kW，夏季：蒸发器 进出水温度为 12/7℃，冷凝器进出水温度为 37/32℃；冬季：冷凝器进出水温度为 50/60℃，蒸 发器进出水温度为 18/12℃	2 台	
9	RLD-01	热回收冷冻水泵	立式泵，流量 60m ³ /h，扬程 28m	3 台	2 用 1 备
10	RLQ-01	热回收冷却水泵	立式泵，流量 70m ³ /h，扬程 34m	3 台	2 用 1 备
11	CT-02	热回收冷却塔	开式，流量 150m ³ /h， 夏季工况 37/32℃	2 台	
12	XL-01	开式蓄冷罐	φ8000×15000（高）mm，有效容积 600m ³	3 座	

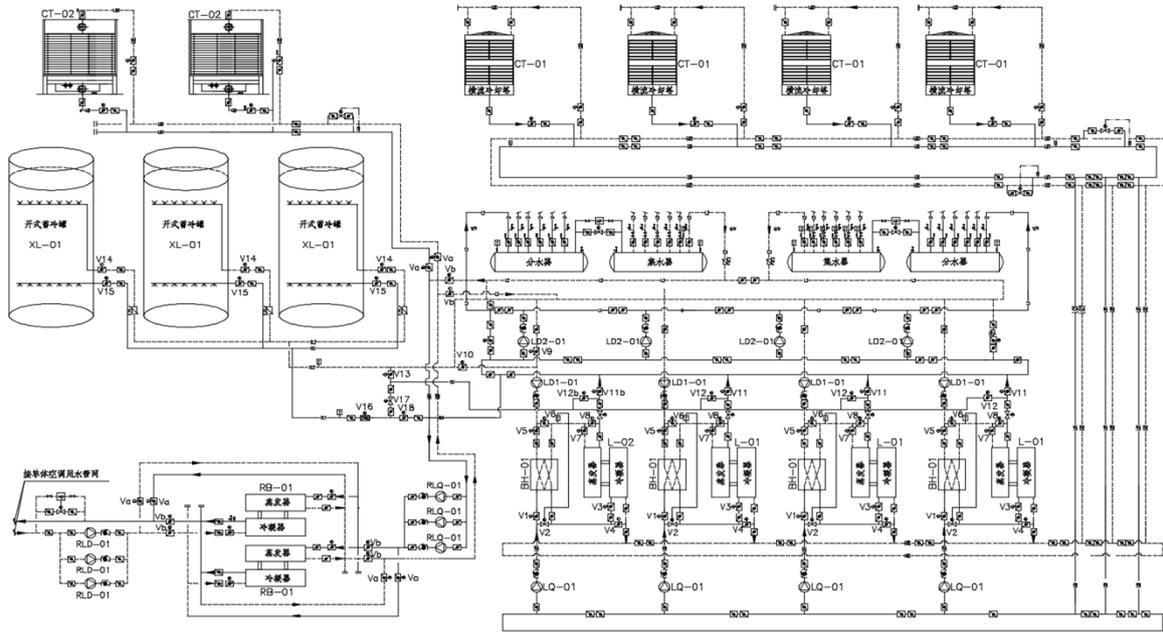


图 1 系统流程图

Fig.1 System flow chart

表 6 不同运行模式阀门状态

Table 6 Valve status under different operation modes

运行模式	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀
完全自然冷却	开	调	关	开	开	关	关	开	关	关
部分自然冷却	开	调	开	关	开	关	开	关	关	关
全压缩制冷	关	开	开	关	关	开	开	关	关	关
蓄冷+供冷	关	开	开	关	关	开	开	关	关	开
蓄冷罐+冷水机供冷	关	开	开	关	关	开	开	关	开	关
蓄冷罐单独供冷	—	—	—	—	—	—	—	—	—	关
蓄冷罐+完全自然冷却	开	关	关	开	开	关	关	开	开	关
运行模式	V ₁₁	V _{11b}	V ₁₂	V _{12b}	V ₁₃	V ₁₄	V ₁₅	V ₁₆	V ₁₇	V ₁₈
完全自然冷却	开	关	关	关	关	开	关	关	关	关
部分自然冷却	开	关	关	关	关	开	关	关	关	关
全压缩制冷	开	关	关	关	关	开	关	关	关	关
蓄冷+供冷	开	关	关	开	关	开	开	开	开	关
蓄冷罐+冷水机供冷	开	开	关	关	开	开	开	调	调	开
蓄冷罐单独供冷	—	—	关	关	开	开	开	调	调	开
蓄冷罐+完全自然冷却	关	关	开	开	关	开	开	调	调	开

注：水源热泵供冷时：电动蝶阀 V_a 打开，V_b 关闭；供热时：电动蝶阀 V_a 关闭，V_b 打开。

3 能源消耗预测

数据机房能耗按其满负荷运行计算，工艺性空调三种运行模式及运行时间如表4所示，冷水机组制冷性能系数 (COP_n) 变化如图2所示，计算冷水机组能耗时按图2考虑性能变化的影响。冷却水泵、

冷冻水泵、冷却塔等按额定功率计算，不考虑实际运行中冷却塔风机的调整，板式换热器的换热温差按 1.5℃ 计算。基于上述计算条件，在不考虑热回收机组及蓄冷装置运行的情况下，工艺性空调冷源系统全年运行能耗如表7所示。

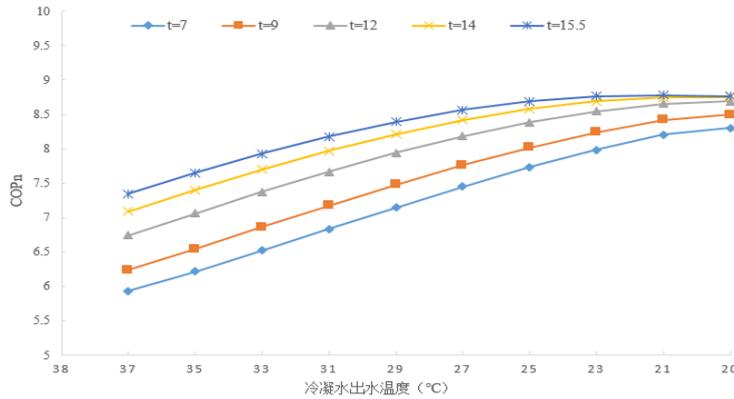


图2 不同工况冷水机组 COP 变化

Fig.2 Cop change of chillers under different working conditions

表7 工艺性空调冷源系统全年运行电耗

Table 7 Annual operation power consumption of process air conditioning cold source system

运行模式	电耗 (kWh)	占比
完全自然冷却	1709284	13.12%
部分自然冷却	1685527	12.93%
完全压缩制冷	9635953	73.95%
总计	13030764	100%

从表4及表7中可以看出,完全压缩制冷模式运行时间占全年运行时间的54.56%,但其能耗占全年运行总能耗的73.95%;完全自然冷却运行时间占全年运行时间的30.25%,其能耗占全年运行总能耗的13.12%。说明完全压缩制冷运行模式的能耗远大于完全自然冷却模式,延长完全自然冷却的运行时间是降低运行能耗的有效措施。

热回收机组为数据机房新风机组提供冷热源,运行时间与新风参数有关。夏季时新风处理至室内焓值,理论上当室外新风焓值大于室内焓值时,需要对新风进行冷却,热回收机组制冷模式运行,本文近似按室外干球温度大于24℃时需要热回收机组制冷,综合考虑舒适性空调的运行需求,全年制冷运行时间约3850h。冬季运行时间按北京市采暖季时间计算,运行时间2880h。

机房设计新风冷负荷占热回收机组承担的设计冷负荷的48%,机房设计新风热负荷占热回收机组承担的设计热负荷的58%,考虑室外新风参数的变化因素,机房新风冷热源系统能耗按1台热回收机组及对应的冷却水泵、冷冻水泵及冷却塔计算。

计算得出机房的全年制冷电耗: 340725kWh, 全年制热电耗: 336182kWh。

数据机房空调末端及新风处理机总功率879kW, 全年运行8760h, 全年运行总电耗为7700040kWh。数据机房制冷空调系统全年运行电耗统计如表8所示。

表8 数据机房制冷空调系统全年运行电耗统计

Table 8 Annual power consumption statistics of refrigeration and air conditioning system in data room

项目	电耗 (kWh)	占比
工艺性空调冷源	130307	60.87%
新风处理热源	336182	1.57%
新风处理冷源	340725	1.59%
空调末端	770004	35.97%
总计	214077	100%

数据中心PUE是数据中心总能耗与IT设备能耗之比,总能耗包括IT设备能耗、空调系统能耗、电力系统损耗及安防设备等其他能耗。IT设备100%满负荷运行时,IT设备总功耗7450kW,电力系统及其他损耗700kW,全年运行总电耗如表9所示,计算得PUE值为1.40。

表 9 数据机房全年运行电耗统计

项目	电耗 (kWh)	占比
IT 设备电耗	68766000	71.40%

4 效益分析

4.1 水蓄冷系统

表 10 北京城区 1~10kV 一般工商业用电销售电价表

Table 10 Sales price of 1~10kV general industrial and commercial electricity in Beijing urban area

类别	时段	电价 (元/kWh)	时间 (h)
尖峰段 (7~8 月)	11:00~13:00; 16:00~17:00	1.3993	3
高峰段	10:00~15:00; 18:00~21:00	1.2710	8
平段	7:00~10:00; 15:00~18:00; 21:00~23:00	0.7523	8
谷段	23:00~7:00	0.2849	8

该数据中心位于北京城区,用电属于一般工商业用电,其用电销售价格如表10所示。本工程蓄冷系统设计单独供冷时间为2.3h,并预留15Min的应急供冷量,主要考虑在尖峰时段和高峰时段投入使用,降低运行费用。本文将着重分析设置蓄冷后的运行费用,并与不设置蓄冷(仅考虑应急蓄冷)的运行费用进行对比。为便于分析,仅按水蓄冷自由支配冷量6500RTh的能耗计算运行费用。为保证冷

机蒸发器流量,夜间蓄冷分为两个循环(各4h),第一循环将水温由18°C降至12°C,第二循环将水温由12°C降至4°C。

表11为有蓄冷和无蓄冷时的运行费用对照表,完全机械制冷模式下,无蓄冷时尖峰和高峰时段电费为1349872.34元,设置蓄冷后尖峰和高峰时段电费及谷段蓄冷电费总计为496142.68元,设置蓄冷后每年预计可节省电费853729.65元。

表 11 有无蓄冷时运行费用对比

Table 11 Comparison of operating costs with and without cold storage

方案	运行模式	用电时段	耗电功率 (kW)	日运行时长 (h)	日能耗 (kWh)	电价 (元/kWh)	尖峰时段日电费 (元/日)	全年运行日数 (日)	尖峰时段年电费 (元/年)	总电费 (元/年)
无蓄冷	完全机械制冷	尖峰	2249.67	2.3	5174.23	1.3993	7240.30	62	448898.80	1349872.34
	完全机械制冷	高峰	2249.67	2.3	5174.23	1.271	6576.45	137	900973.54	
有蓄冷	蓄冷罐单独供冷	尖峰	163.52	2.3	376.10	1.3993	526.27	62	32629.04	496142.68
	蓄冷罐单独供冷	高峰	163.52	2.3	376.10	1.271	478.02	137	65488.92	
	蓄冷第一循环	谷段	733.22	4	2932.89	0.2849	835.58	199	166280.39	
	蓄冷第二循环	谷段	1021.89	4	4087.55	0.2849	1164.54	199	231744.34	

数据中心无蓄冷时,需要设置应急蓄冷水罐,储存15min的应急供冷量,需要设置容积200m³的

蓄冷罐1座,与设置水蓄冷相比的初投资、运行费用及静态投资回收期如表12所示。

表 12 蓄冷装置初投资及静态投资回收期

Table 12 Initial investment and static investment payback period of cold storage unit

方 案	蓄冷罐容 积 (m ³)	蓄冷设施初 投资 (元)	尖 (高) 峰 运行费用 (元)	初投资增加 额 (元)	年运行费用 减少额 (元)	静态投资回 收期 (年)	十年期效益 (元)
无蓄冷	200×1	920000	1349872.34	4680000	853730	5.48	4057297
有蓄冷	600×3	5600000	496142.68				

4.2 余热回收系统

本数据中心设置余热回收水源热泵机组,回收数据中心的余热用于数据中心新风热负荷及办公场所的采暖,热回收机组承担的采暖设计热负荷290kW,机房新风设计热负荷400kW。新风热负荷全天运行24h;办公楼采暖热负荷全天进行12h,并考虑间歇系数1.2,年运行天数120天(11月15日至次年3月15日),负荷率按常规进行估算。办公楼不供暖时段1台水源热泵运行,满足机房新风负荷。

根据北京市供暖收费标准,市政热网收费分为

基本热价和计量热价,非居民基本热价为18元/m²,计量热价为0.36元/kWh,不含数据机房的供暖面积约6000m²,计算基本热价时未包含数据机房面积。计算水源热泵电耗时,COP按4.6考虑,电费单价按本文表10中分阶段电价考虑,办公供暖时间8:00至20:00,加权计算后电价为1.0549元/kWh;数据机房全天24h运行,加权计算后电价为0.7694元/kWh。运行费用计算结果见表13,由于两种方案流体输配系统的运行费用差距较小,为便于比较,表13中未包含流体输配系统的运行费用。

表 13 市政热网供热与余热回收系统供热运行费用对比

Table 13 Comparison of heating operation cost between municipal heating network and waste heat recovery system

类别	设计热负 荷 (kW)	负荷率	预计热负 荷 (kW)	日运行 时数 (h)	年运行天数 (天)	间歇 系数	年供热量 (kWh)	热网供热 年运行费 用 (元)	热回收年 运行费用 (元)
冬季办 公供暖	290	100%	290	12	10	1.2	41760	123033.60	9576.66
	290	75%	217.5	12	40	1.2	125280	153100.80	28729.97
	290	50%	145	12	35	1.2	73080	134308.80	16759.15
	290	25%	72.5	12	35	1.2	36540	121154.40	8379.58
机房新 风预热	400	100%	400	24	10	1	96000	34560.00	16057.04
	400	75%	300	24	40	1	288000	103680.00	48171.13
	400	50%	200	24	35	1	168000	60480.00	28099.83
	400	25%	100	24	35	1	84000	30240.00	14049.91
总 计								760557.60	169823.27

根据表13运行费用的对比,采用余热回收系统供暖后,每年可节省运行费用约59万元,并可节省

工艺空调系统冷却塔、冷却泵的部分运行能耗。

表 14 市政供热与余热回收系统初投资对比

Table 14 Comparison of initial investment of municipal heating and waste heat recovery system

方案	制冷站及一次管线初投资 (元)	冷水机组/水源热泵 (元)	初投资总计 (元)
市政热网供热	1450000	1680000	3130000
热回收系统	—	2020000	2020000

若采用城市热网供暖需要建设换热站,增加换热器、水泵等设备,并需要架设一次热水管线,且仍需要设置冷水机组满足夏季空调负荷。余热回收系统通过采用水源热泵机组代替冷水机组,实现夏季供冷冬季供热,相比新建换热站预计将节省初投

资约111万元,预计初投资详如表14所示。

5 结语

(1) 数据中心空调系统采用完全压缩制冷时的能耗远大于完全自然冷却时的能耗。延长完全自

然冷却的运行时间,并减少完全压缩制冷的运行时间,是降低数据中心冷却能耗的主要方向。可采取提高冷冻水供水温度及加大冷却塔冷却能力等措施实现。

(2) 数据中心全年不间断运行,空调冷负荷较为稳定,设置水蓄冷系统,夜间谷段蓄冷,日间尖峰和高峰时段释冷,能有效降低运行费用。以本文中的项目为例,通过储存数据中心2.3h的冷量,每年可节省运行费用约85 万元,静态投资回收期5.48年,具有推广应用的价值。

(3) 回收数据中心的余热用于机房新风处理及辅助办公建筑的供暖,能降低能源消耗。以本文中的项目为例,与采用市政热网供热相比初投资低,运行费用也低,具有明显的经济效益和社会效益,值得推广应用。

参考文献:

- [1] GB 50174-2017, 数据中心设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社,2017.
 - [2] 折建利,黄翔,刘凯磊. 冷却塔自然供冷系统在兰州某数据中心应用的测试分析[J]. 暖通空调,2016,46(10):22.
 - [3] 殷平. 数据中心研究(7): 自然冷却[J]. 暖通空调,2017,(11):49-60.
 - [4] 张海南,邵双全,田长青. 数据中心自然冷却技术研究进展. 制冷学报,2016,(4):46-54.
 - [5] 傅烈虎. 数据中心空调系统设计应关注的问题[J]. 制冷与空调,2017,(11):70-75.
 - [6] 高亭亭. 华北地区数据中心冷却方式优化研究[D]. 保定: 华北电力大学,2019.
 - [7] 陈庆. 数据中心能耗指标 PUE 解析[J]. 中国金融电脑,2019,(4):40-45.
 - [8] 许文民. 降低数据中心 PUE 值的方法研究[J]. 科技与创新,2016,(20):110-111.
 - [9] 吕继祥,王铁军,赵丽,等. 基于自然冷却技术应用的数据中心空调节能分析[J]. 制冷学报,2016,37(3):113-118.
 - [10] 张华. 数据中心空调节能技术探讨及新型机械冷却+自然冷却空调技术研究[J]. 上海节能,2016,(7):376-379.
 - [11] 钱晓栋,李震. 数据中心空调系统节能研究[J]. 暖通空调,2012,(3):91-96.
 - [12] 黄翔,李婷婷,刘凯磊,等. 乌鲁木齐某数据中心热环境分析及气流组织优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,(1):104-108.
 - [13] 肖新文,魏赠,曾春利. 间接蒸发冷却空调箱机组制冷的数据中心气流组织探讨[J]. 制冷与空调,2020,(1):62-69.
 - [14] 熊慧亮,涂祥宇. 数据中心工程中暖通系统节能措施的分析[J]. 现代信息科技,2019,(14):89-90.
 - [15] 张建伟. 某数据中心空调系统设计及节能优化分析[J]. 建筑工程技术与设计,2018,(25):39-45.
 - [16] 吴一凡. 数据中心自然冷却技术的现状探讨[J]. 节能,2018,(7):103-105.
-
- (上接第 855 页)
- [21] GB 50264-2013, 工业设备及管道绝热工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社,2013.
 - [22] CIBSE TM52.2013, The Limits of thermal comfort: avoiding overheating in European buildings[C]. 2013 Chartered Institution of Building Services Engineers London, UK, 2013.
 - [23] Georgios Gourlis, Iva Kovacic. Passive measures for preventing summer overheating in industrial buildings under consideration of varying manufacturing process loads[J]. Energy, 2017,137:1175-1185.
 - [24] 陈尚斐,隋学敏. 不同冷辐射表面位置对内嵌管式围护结构供冷房间负荷的影响[J]. 制冷与空调,2020,34(1): 86-90.
 - [25] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. Atlanta:ASHRAE, 2013.
 - [26] Guo H S, Aviv D, Loyola M, et al. On the understanding of the mean radiant temperature within both the indoor and outdoor environment, a critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020,117.
 - [27] Guo H S, Ferrara M, Coleman J, et al. Simulation and measurement of air temperatures and mean radiant temperatures in a radiantly heated indoor space[J]. Energy, 2020,193.
 - [28] 胡斌,陈金华,姚润明,等. 地板辐射供冷系统室内平均辐射温度的计算方法及壁面发射率因素分析[J]. 暖通

- 空调,2020,50(5):34-41,25.
- [29] 李俊锋, 孟晓静, 魏贝贝, 等. 既有工业建筑围护结构热工性能参数特征分析[J]. 暖通空调, 2019, 49(2): 67-70.
- [30] 王怡. 工业建筑节能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.