

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-262-06

怀来两栋数据中心采用不同空调系统的对比分析

于 晔

(中广电广播电影电视设计研究院有限公司 北京 100045)

【摘要】 以实际项目为例, 通过介绍张家口怀来某数字经济园区两栋数据中心的空调系统形式, 分析对比水冷系统和间接蒸发冷却系统的各项指标, 包括 PUE、WUE、SUE、初投资、运行费用等数据, 结果表明在同等建筑规模情况下, 采用水冷冷冻水系统的数据中心可承载的机柜数量更多, 初投资更少; 而采用间接蒸发冷却空调系统的数据中心在节能、节水、运行费用方面更具优势。

【关键词】 数据中心; 水冷冷冻水系统; 间接蒸发冷却空调系统; PUE; WUE; 经济性分析
中图分类号 TU831 文献标志码 A

Comparative Analysis of Different Air Conditioning Systems Used in Two Data Centers in Huailai Yu Ye

(Radio, Film and Television Design & Research Institute Co., Ltd, Beijing, 100045)

【Abstract】 This paper takes the actual project as an example. By introducing the air-conditioning system form of two data centers in a digital economic park, this paper analyzes the indicators of comparison of water-cooled systems and indirect evaporative cooling systems, including PUE, WUE, SUE, initial investment, operating costs, etc., the results show that the number of cabinets that can be loaded by the data center of the water-cooled system is more, and the initial investment is less; The data center with the evaporative cooling system is more advantageous in energy conservation, water saving and operating costs.

【Keywords】 data center; water-cooled cold frozen water system; indirect evaporative cooling air conditioning system; PUE; WUE; economical analysis

0 引言

近年来随着云计算、5G、大数据、AI 等新数字技术的加速发展, 我国数据中心的需求逐年快速增加, 2022 年市场规模超 2200 亿^[1]。地处寒冷地区的张家口怀来作为京津冀算力网络国家枢纽节点重要组成部分, 截止 2023 年新增标准机柜 11 万架, 2025 年总量将达到 40 万架^[2]。全国数据中心用电量占全社会用电量 2% 左右, 空调制冷系统能耗在数据中心中约占 40%, 是除 IT 能耗外占比最大的部分。本文以实际项目为例, 通过介绍张家口怀来某数字经济园区两栋相同建筑规模数据中心的空调系统形式, 对水冷冷冻水系统和间接蒸发冷却空调系统进行综合对比分析, 包括 PUE (电能利

用效率=数据中心内所有用电设备消耗总电量/所有电子信息设备消耗的总电能)、WUE (水利用率=数据中心内所有用水设备消耗总水量/所有电子信息设备消耗的总电能)、SUE (空间利用有效性=数据中心总建筑面积/电子信息设备直接占用建筑面积)、初投资、运行费用等数据, 以供参考。

1 工程概述

1.1 工程概况

本工程为怀来某数字经济园区一期工程, 包括 A、B 两栋数据中心, 运维楼及柴发机房。两栋数据中心工程概况如表 1 所示。

表 1 A、B 两栋数据中心工程概况
Table 1 A, B data center project overview

编号	等级	建筑面积/(m ²)	层数	建筑高度/(m)	机柜数量/(架)	单机柜功耗/(kW)	综合系数
A 数据中心	A 级	26000	5	35.5	1700	10.5	0.92
B 数据中心	A 级	26000	5	31.3	2336	10.5	0.90

注：综合系数为单机柜实际使用功耗与单机柜最大功耗比值。

1.2 室内外设计参数

1.2.1 室外设计参数

怀来县地处中温带半干旱区，属温带大陆性季风气候，具有四季分明，光照充足，雨热同季，昼夜温差大等气候特点。年均日照时数 3027 小时，全年无霜期 149 天。因数据中心需全年不间断制冷，需保证空调制冷系统在极端气候条件下正常运行，温度选用 ASHRAE2021 handbook fundamentals 提供的参数进行计算。全年干球温度时长分布如图 1 所示，全年湿球温度时长分布如图 2 所示，室外极端设计计算参数见表 2 所示。

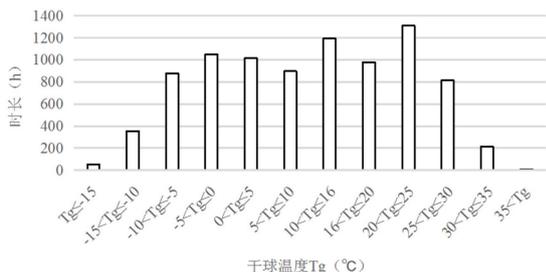


图 1 全年干球温度时长分布

Fig.1 Long distribution of dry ball temperature

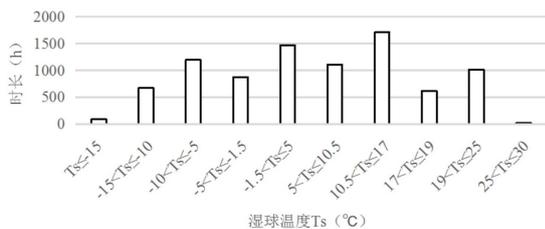


图 2 全年湿球温度时长分布

Fig.2 Long distribution of wet ball temperature

表 2 室外极端设计计算参数

Table 2 Outdoor extreme design calculation parameters

	极端最低	极端最高
干球温度/℃	-21.8	39.7
湿球温度/℃	-22.6	26.9

1.2.2 室内设计参数

室内设计参数见表 3 所示。

表 3 室内设计参数

Table 3 Interior design parameters

功能区域	干球温度/ (℃)	相对湿度/ (%)	新风量/ (次/h)	温度变化率/ (℃/h)
机房冷通道	24	≤50&>30	0.8	<5
机房热通道	37	—	0.8	<5
电力室	≤35	—	—	—
电池室	20~30	—	—	—
高压室	≤35	—	—	—
主机房环境 颗粒物	主机房每立方米空气中大于或等于 0.5μm 的 悬浮粒子数浓度应少于 1760000 粒			

2 空调系统

2.1 A 栋数据中心

A 栋数据中心空调总冷负荷为 18672kW，其中数据机房工艺冷负荷为 16422kW，电力电池用房及辅助机房冷负荷为 1826kW，建筑围护结构冷负荷为 424kW。

A 栋数据中心共 5 层，IT 模块机房共 17 个，每个模块机房布置 100 架 10.5kW 机柜，IT 模块机房平面如图 3 所示。

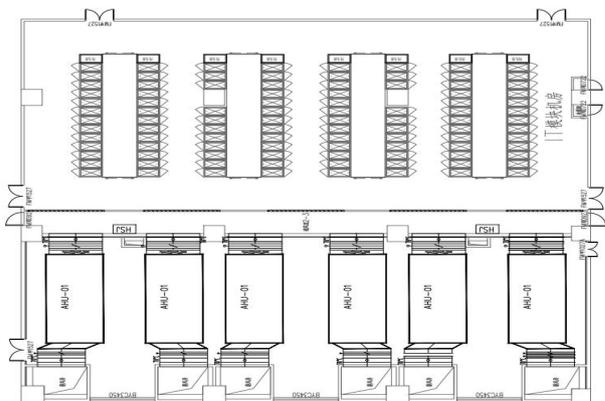


图 3 A 栋 IT 模块机房平面

Fig.3 Plane of IT module machine room in Building A

IT 模块机房采用间接蒸发冷却空调机组进行制冷，空调设备按 5+1（热备份）设置，每台显热

制冷量为 220kW（机械补冷 120kW），机组分别设置于各层机房靠外墙一侧的设备平台。间接蒸发冷却空调机组由换热芯体、机械制冷补充装置、喷淋系统、室内侧循环风机、室外侧循环风机、控制系统等组成。间接蒸发冷却机组的压缩机、风机及喷淋水泵由一路市电+UPS 提供电量。

因本地区水资源匮乏，故采用节水模式，具体系统运行模式：（1）干模式： $T_g \leq 16^\circ\text{C}$ ；（2）湿模式： $16^\circ\text{C} < T_g, T_s \leq 19^\circ\text{C}$ ；（3）混合模式： $T_s > 19^\circ\text{C}$ ；

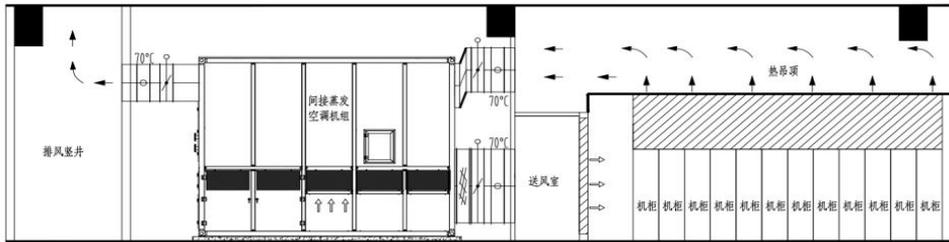


图 4 间接蒸发冷却机组气流组织示意图

Fig.4 Schematic diagram of air flow tissue in indirect evaporation cooling unit

在每层设备平台的外墙设置百叶进风口，间接蒸发冷却空调机组室外侧经吸热后的热风排至竖井到屋面。为减少各层排风之间互相影响导致散热欠佳的问题，本工程 2~4 层竖向同位置机组排风共用一个排风竖井排至室外，5 层单独接屋面排至室外。

2.2 B 栋数据中心

B 栋数据中心空调总冷负荷为 24626kW，其中数据机房工艺冷负荷为 22076kW，电力电池用房及辅助机房冷负荷为 2118kW，建筑围护结构冷负荷为 432kW。

B 栋数据中心共 5 层，IT 模块机房共 16 个，每个 IT 模块机房可布置 146 架 10.5kW 机柜，IT 模块机房平面如图 5 所示。

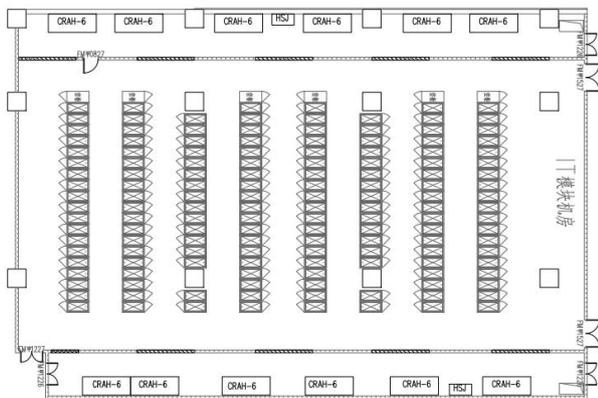


图 5 B 栋 IT 模块机房平面

Fig.5 Plane of IT module machine room in Building B

高低压配电用房、电力室、电池室等支持用房采用风冷氟泵型精密空调系统，N+1 冗余配置。电池室空调带电加热模块。精密空调风机采用直流变频 EC 风机。

IT 模块机房采用封闭热通道，弥散送风，吊顶回风方式的气流组织，房间进深为 12m，采用单侧送风，气流组织如图 4 所示。送回风温度为 24°C/37°C，间接蒸发冷却空调机组将 24°C 的冷风送至送风室后通过侧送百叶风口送至机房冷通道内。

冷源采用 10KV 高压离心式冷水机组+板式换热器+开式冷却塔的冷源系统，共配置 5 台 2050RT 离心式冷水机组，4 用 1 备。每台离心冷水机组配套 1 台板式换热器，过渡季节或冬季，由开式冷却塔+板式换热器利用较低的室外气温提供冷源，减少冷水机组开启时间、降低能源消耗。

本设计冷冻水系统采用一级泵变流量系统，供回水温度为 17/23°C。制冷系统设置 5 台冷冻水泵和 5 台冷却水泵，冷冻水泵及冷却水泵与冷水机组一一对应。冷冻水泵、冷却水泵均为变频泵，采用末端环路压差控制。系统干管采用环路设计，保证单点故障时系统的正常运行。

为保证冷冻水系统的供冷可靠性，防止突然停电或机器故障引起制冷中断事故，制冷系统设置 4 台 260m³ 的闭式蓄冷罐。蓄冷罐可提供数据机房空调系统满负荷运行 15 分钟。冷冻水泵、空调末端机组及空调水系统的电动阀门均配置 15 分钟的不间断电源供电。

空调冷却水采用冷却塔与冷水机组一对一配置形式，采用开式逆流冷却塔，冷却水夏季供回水温度 36/30°C（湿球温度 26.9°C），冬季供回水温度 21.5/15.5°C（湿球温度 10.5°C）。

系统运行模式：（1）冷水机组制冷运行： $17^\circ\text{C} < T_s$ ；（2）部分自然冷却运行： $10.5^\circ\text{C} < T_s \leq 17^\circ\text{C}$ ；（3）完全自然冷却运行： $T_s \leq 10.5^\circ\text{C}$ ；

空调末端采用冷冻水型机房精密空调，空调区按 10+2 冗余配置。空调机组采用封闭热通道，弥散送风的气流方式，送回风温度为 24℃/37℃，房间进深为 16m，采用双侧送风，通过空调区侧开百叶送入机房，机组上部通过吊顶回风。

3 对比分析

3.1 运行模式对比

分别对 A、B 两栋数据中心的两种空调制冷系统在不同运行模式下的全年时长进行统计，如表 4 所示。

表 4 两种系统各运行模式下全年时长统计

Table 4 All-year duration statistics in each operation mode of the system

间接蒸发冷却系统 (A 栋)				水冷冷冻水系统 (B 栋)			
运行模式	温度范围/ (°C)	时长/ (h)	全年时间占比	运行模式	温度范围/ (°C)	时长/ (h)	全年时间占比
干工况	$T_g \leq 16$	5438	62%	完全自然冷却	$T_s \leq 10.5$	5406	61%
湿工况	$16 < T_g, T_s \leq 19$	2298	26%	部分自然冷却	$10.5 < T_s \leq 17$	1711	20%
混合工况	$T_s > 19$	1024	12%	冷机制冷	$17 < T_s$	1643	19%

通过表中数据分析对比可知，间接蒸发冷却系统的干工况及湿工况均属于完全自然冷却，全年时长占比高达 88%，而水冷冷冻水系统完全自然冷却全年时长为 61%。可见，间接蒸发冷却系统在完全自然冷却时长上有明显优势。

3.2 能耗对比

分别对 A、B 两栋数据中心在不同负载率下全年 8760 个小时的逐时能耗统计分析，并计算年均 PUE。如图 6 所示，图中数据均为计算理论值。

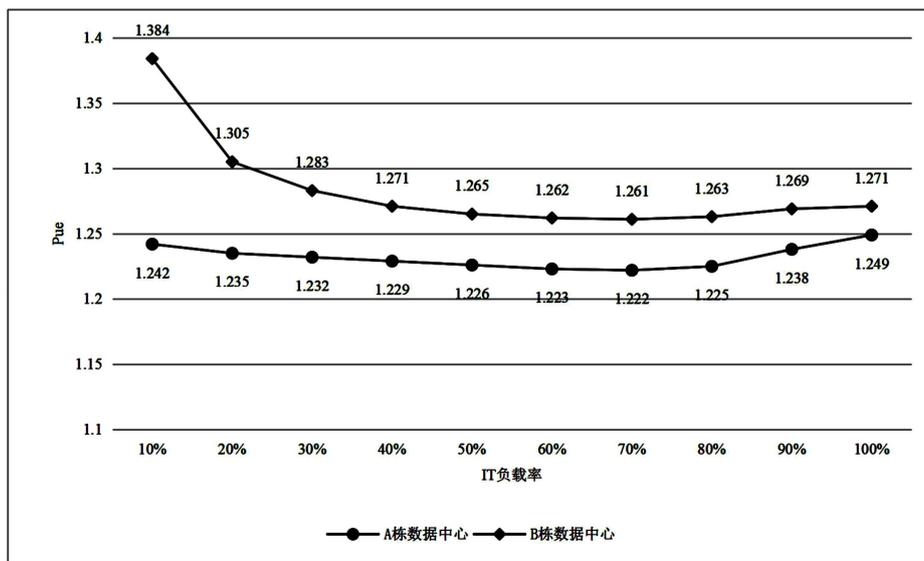


图 6 A、B 数据中心不同负载率 PUE

Fig.6 A, B Data Center PUE

通过图中分析对比可知，A、B 两栋数据中心除个别低负载工况外 PUE 值均满足 <1.3 要求，而 A 栋 PUE 值略优于 B 栋 PUE 值，相对更节能。

A 栋数据中心，当 IT 负载率由 10% 升高至 100%，PUE 随负载率变化呈现出先降低后升高的变化趋势。负载率低于 30% 和大于 80% 工况下 PUE 略大，当负载率介于 30% 和 80% 之间工况下，因压

缩机及风机的能效较高，故该部分负载区域 PUE 值相对较低，其中负载率为 70% 时 PUE 最低。

B 栋数据中心，当 IT 负载率由 10% 升高至 100%，同样，PUE 随负载率变化呈现出先降低后升高的变化趋势。低负载下冷机运行能效较低，且运行能耗占比大，且水泵变频功耗不宜太低，因而低负载情况下冷源能耗较高，故负载率小于 40% 下

PUE 较高；随着 IT 负载的增加，冷机的运行能效随之增高，在 IT 负载率介于 40%和 80%之间的工况下，冷机运行能效均较高，因而 PUE 较优；满载时，空调主机能效要比部分负载下低，从而导致满载时，PUE 增大。可见，空调系统在部分负载率下的能耗更优，因此，数据中心的空调设备往往采用热备份方式运行，即同时开启主用和备用机组降

低单台机组的负载率，使得机组在能效较高的区域运行。

3.3 耗水量对比

分别对 A、B 两栋数据中心在不同负载率下全年逐时耗水量统计分析，并计算年均 WUE，如表 5 所示。

表 5 A、B 栋数据中心耗水量统计

Table 5 A, B Data Center Water Consumption Statistics

负载率	间接蒸发冷却系统 (A 栋)			水冷冷冻水系统 (B 栋)		
	IT 功耗/(kW)	年耗水总量/(吨)	年均 WUE	IT 功耗/(kW)	年耗水总量/(吨)	年均 WUE
100%	16422	70508	0.49	22076	446721	2.31
75%	12317	57830	0.54	16577	336898	2.32
50%	8211	41362	0.58	11038	226261	2.34
25%	4106	22225	0.62	5519	113630	2.35

通过表中数据分析对比可知，A 栋数据中心的耗水量远小于 B 两栋数据中心的耗水量，在不同负载率运行工况下计算 WUE 值，A 栋为 B 栋的 20%~30%之间，在统计总耗水量时，不仅包括设备本身耗水量，还需考虑水处理设备处理市政供水过程的消耗水量，这部分耗水量按照 5%考虑。

3.4 空间利用有效性对比

分别对 A、B 两栋数据中心的空间利用有效性 (SUE) 进行统计分析对比，SUE 按公式 (1) 计算，统计计算结果如表 6 所示。

$$SUE = \frac{A}{A_k} \tag{1}$$

式中：A 为数据中心总建筑面积，m²；A_k 为 IT 设备直接占用建筑面积，m²。A_k 为机柜实际功率折算成 2.5kW (42U，19 英寸) 的标准机柜后的面积，折算按公式 (2) 计算：

$$A_k = \frac{A_0 \times (2X + 1)}{3} \tag{2}$$

式中：A₀ 为标准 2.5kW (42U，19 英寸) 机柜占用建筑面积 A₀=0.72m²；X 为机柜当量系数，X=实际机柜功率 (kW) / 2.5 (kW)。

表 6 A、B 两栋数据中心空间利用有效性

Table 6 A, B Data Center Space Utilization

编号	建筑面积/ (m ²)	机柜数量/ (架)	单机柜功耗/ (kW)	单机柜占有面积 / (m ² /架)	单功率占有面积 / (m ² /kW)	SUE
A 数据中心	26000	1700	10.5	15.3	1.46	6.78
B 数据中心	26000	2336	10.5	11.1	1.06	4.93

由此可见，在供电充足的前提下，相同建筑面积的数据中心采用不同空凋制冷系统时，可容纳的机柜数也不相同，采用水冷冷冻水空凋系统的 B 栋数据中心比采用间接蒸发冷却系统的 A 栋数据中心的机柜数量可以增加 636 架，约 37%。原因在于间接蒸发冷却空凋占用的设备平台面积远大于

制冷机房面积。

3.5 经济性对比

分别对 A、B 两栋数据中心的暖通空凋系统的初投资及运行费用进行对比，其中初投资包括通风防排烟系统、新风系统、空凋系统的总投资，结果如表 7 所示。

表 7 A、B 两栋数据中心经济分析表

Table 7 A, B Data Center Economic Analysis Table

编号	空调系统形式	初投资/(万元)	空调全年耗电量/(kWh)	空调全年用电费用/(万元)	空调年耗水量/(吨)	空调全年用水费用/(万元)
A 数据中心	间接蒸发冷却空调	8477	19911480	1195	70508	52
B 数据中心	水冷系统	7055	33769800	2026	446721	330
差值	—	1422	13858320	831	376213	278
静态投资回收期(年)				1.28		

结果表明, A 栋数据中心采用间接蒸发冷却空调系统比采用水冷冷冻水系统的 B 栋数据中心的暖通初投资增加 1422 万元, 年运行费用节约 1109 万元, 与 B 栋相比 A 栋数据中心静态投资回收期为 1.28 年。

4 结论

(1) 相同建筑面积的情况下, 采用水冷系统的数据中心比采用间接蒸发冷却空调系统的空间利用有效性更好, 在供电充足的前提下, 可以布置更多的机柜, B 栋机柜数量比 A 栋多 636 架, 增加约 37%。

(2) 在能耗方面, A 栋 PUE 值略优于 B 栋 PUE 值, 相对更节能, 但二者的差距并不是很大, 水冷系统在运维策略及智能控制方面还有很大的节能潜力, 需对室外空气温度变化、不同负载率及系统内各设备的最优工况点, 进行综合耦合计算, 总结出不同工况下的运行策略, 并通过 AI 控制提高能效。

(3) A 栋数据中心的耗水量明显优于 B 栋, A 栋仅为 B 栋的 20%~30%。在水资源匮乏地区间接蒸发冷却空调系统是很好的选择。

(4) 从经济性方面考虑, A 栋数据中心的初投资略高于 B 栋, 而运行费用 B 栋更高, 与 B 栋相比 A 栋数据中心静态投资回收期为 1.28 年。

(5) 不同的空调制冷系统有各自的特点, 在选择系统形式时不仅要考虑技术和经济方面, 还要满足不同客户在安全性、使用场景的需求。

本文通过实际项目对两种不同空调制冷系统进行全面对比分析, 包括空间利用率、能耗、耗水量、经济性各方面分析对比。本项目位于张家口怀来, 具有半干旱地区干燥、气温较低的特点, 在华北北部及内蒙中西部地区具有典型代表性, 分析对比结果在该区域具备一定参考性。

参考文献:

- [1] 中国通服数字基建产业研究院. 中国数据中心产业发展白皮书(2023年版)[M]. 南京: 中国通服数字基建产业研究院, 2023.
- [2] 河北省人民政府办公厅. 河北省人民政府办公厅关于印发张家口数据中心集群建设方案的通知[EB/OL]. [2023-06-29]. <http://info.hebei.gov.cn/hbszfxgk/6806024/6807473/6806589/7049863/index.html>.