

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-253-07

基于 TRNSYS 的 立管间接-机械制冷空调系统的能耗分析

张高利 孙铁柱 高 帅

(西安工程大学 西安 710048)

【摘 要】 为研究立管间接-机械制冷空调系统在数据中心应用时的能耗问题, 根据城市建筑热工设计分区来选择了典型城市利用 TRNSYS 软件对该空调系统在典型城市的不同运行模式时长、系统全年运行能耗进行了模拟分析。结果表明, 在严寒地区系统干模式占比超 65%, 制冷因子低于 0.2, 节能效果显著; 寒冷地区干模式占比约 60%, 系统能耗在 1100kWh 以内, 节能潜力突出; 夏热冬冷地区与夏热冬暖地区以混合模式为主导, 通过协同运行蒸发冷却与机械制冷, 实现高效温湿度控制; 温和地区干模式占比约 54%, 制冷因子低至 0.16, 展现出优异的节能适应性与运行经济性。

【关键词】 气候分区; 数据中心运行能耗; 模拟分析; 制冷因子

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

Energy Consumption Analysis of Vertical Pipe Indirect-Mechanical Refrigeration Air Conditioning System Based on TRNSYS

Zhang Gaoli Sun Tiezhu Gao Shuai

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

【Abstract】 To study the energy consumption issues of the indirect-mechanical refrigeration air conditioning system in data centers, this paper selects typical cities based on urban building thermal design zones and uses TRNSYS software to simulate and analyze the system's operating modes and annual energy consumption in these cities. The results show that in severe cold regions, the dry mode accounts for over 65% of operation, with a cooling factor below 0.2, demonstrating significant energy-saving effects; in cold regions, the dry mode accounts for about 60%, with system energy consumption below 1100 kWh, highlighting outstanding energy-saving potential; in hot summer and cold winter regions and hot summer and warm winter regions, the mixed mode dominates, achieving efficient temperature and humidity control through the coordinated operation of evaporative cooling and mechanical refrigeration; in mild regions, the dry mode accounts for about 54%, with a cooling factor as low as 0.16, showcasing excellent energy-saving adaptability and operational economy.

【Keywords】 Climatic zoning; HVAC system energy consumption; Design analysis; Chilling factor

0 引言

当前, 全球数据中心电力消耗量约占电力总需求的 2%, 预计到 2030 年这一比例将攀升至 8%。

国内数据显示, 数据中心用电量已持续八年保持 12% 以上的年均增长率^[1], 这使得空调系统的节能优化显得尤为重要。在“碳达峰”和“碳中和”双

基金项目: 自然科学基金基础研究计划一般项目 (面上, 2025JC-YBMS-510)

作者简介: 张高利 (2002-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: zhanggaoli911@163.com

通讯作者: 孙铁柱 (1986-), 男, 博士, 副教授, E-mail: suntiezhu66@163.com

收稿日期: 2025-06-03

重目标驱动下叠加“数字中国”战略的深入推进,作为新基建关键组成部分的数据中心冷却节能技术正日益受到业界重视^[2]。间接蒸发冷却技术凭借其卓越的能效表现,通过有效利用室外干空气能源制备冷量^[3],已在数据中心领域获得广泛应用,特别是与机械制冷相结合的复合式空气处理机组^[4]。该技术在数据中心制冷系统中主要呈现三种运行模式:干模式、湿模式和混合模式^[5]。

针对数据中心空调系统的高能耗特性,研究者对蒸发冷却与机械制冷复合系统的实际应用也进行了深入分析。贺红霞^[6]提出了一种应用于数据中心的露点间接蒸发冷却与机械制冷复合空调,通过对不同运行模式进行实验分析。陈瑞^[7]对间接蒸发冷却复合空调系统主要设备的数学模型搭建了仿真平台进行分析,得到与常规机械制冷系统相比,复合空调系统的全年耗电量为 352.6 万 kWh,节能率高达 34.8%。陈梦^[8]利用间接蒸发冷却性能测试平台,对数据中心用间接蒸发冷却空调机组分析得到数据中心用间接蒸发冷却空调机组应因地制宜地选择运行模式以此降低数据中心空调系统能耗。崔科^[9]以某数据中心为例介绍了利用空气循环处理机组(AHU)回收机房余热系统设计,从设备选型、初投资、运行耗电量、运行成本几方面进行了

方案分析。以上研究对间接蒸发冷却与机械制冷复合空气处理机组在达到相同送风参数时,干模式与湿模式的具体运行能耗进行对比分析。尽管现有成果对运行模式的规划与季节性应用提出了指导原则,但其模式切换策略仍存在进一步优化的空间。尤其是在过渡季节,当机组运行干模式或湿模式均能满足送风要求时,如何通过定量分析两种模式的能耗差异,从而制定最优运行策略以实现精细化节能,成为一个值得深入研究的课题。针对这些不足,本文专注于立管间接-机械制冷复合系统进行建模,采用 TRNSYS 仿真手段对该系统在多种气候条件下的能耗与性能进行了系统性对比分析,还引入“制冷因子”作为统一的能效评价基准,从而为该系统在不同地区的精准应用与优化提供了科学依据。

本文基于 TRNSYS 软件,对立管间接-机械制冷空调系统在不同气候条件城市数据中心的能耗与运行性能进行了模拟分析,并计算出各城市的制冷因子,为立管间接-机械制冷空调系统在不同气候条件下的数据中心空调运行能耗提供参考。

1 机组运行原理及能耗计算

1.1 AHU 机组运行原理

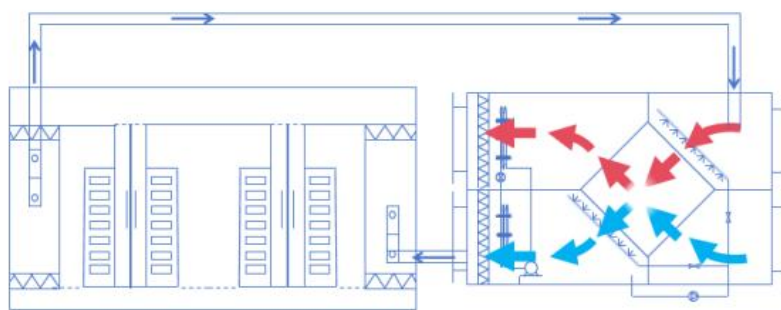


图 1 间接蒸发冷却机组原理图

Fig.1 Schematic diagram of indirect evaporative cooling

图 1 为 AHU 机组原理图。其主要部件是由间接蒸发冷却系统与机械制冷系统组成,根据室外温湿度变化以及数据中心送回风温度要求,可有三种运行模式满足送风温度要求,分别是干模式、湿模式以及蒸发冷却与机械制冷同时运行。

(1) 干模式:干模式作为间接蒸发冷却与机械制冷复合空调系统的基础节能策略,其核心在于利用室外低温空气与数据中心内部热空气进行非接触式热交换。该模式通过间接蒸发冷却器的板式

或管式换热结构,实现室外新风与室内回风的显热传递,全程保持空气隔离以避免湿度交叉。当外部环境温度低于数据中心设定温度且湿度处于安全阈值时,系统可完全依赖自然冷源,仅通过风机驱动空气循环,实现零压缩机制冷能耗运行。在春秋过渡季及冬季低温时段具有显著节能效益。

(2) 湿模式:湿模式是在间接蒸发冷却芯体湿通道内喷淋循环水与通道空气进行热湿交换,实现对干通道内空气进行降温。当室外干球温度升高

导致干模式无法实现送风温度要求时, 系统向间接蒸发冷却器的湿通道喷洒循环水, 利用水的相变潜热吸收热量, 从而进一步降低干通道侧空气温度而达到要求。相较于干模式, 其能耗略有提升但远低于纯机械制冷。

(3) 蒸发冷却与机械制冷同时运行: 联合运行模式是应对极端工况的复合解决方案, 通过间接蒸发冷却与机械制冷的协同工作实现精准温控。当湿模式运行也无法实现送风要求时, 同时开启机械制冷, 整机运行, 保障数据中心在极端条件下的安全运行。

1.2 性能评价指标

本文中采用的性能评价指标为 CLF (制冷因子), 是数据中心能源效率的关键性评估指标。数据中心运营商通过定期监测 CLF , 能够精准掌握制冷系统的节能状况, 并据此制定优化策略。 CLF 的物理意义为数据中心制冷设备耗电与 IT 设备耗电的比值, 即:

$$CLF = \frac{P_L}{P_{IT}} \quad (1)$$

式中: P_L 为数据中心制冷设备的总耗电量, kWh; P_{IT} 为数据中心 IT 设备的总耗电量, kWh。

上述公式表明, CLF 值越小, 表示数据中心空调系统运行越节能; CLF 值越大, 表示数据中心空调系统的能耗越大。

1.3 AHU 测试机组概况

实验采用的测试机组为 AHU 机组, 其核心组件包括立管式换热芯体、一次风机、二次风机、循环水泵及循环水箱等, 具体试验台实物如图 2 所示, 其工作原理与工程实际中应用的立管式间接蒸

发冷却器一致。测试机组所采用的基本性能参数如表 1 所示, 表中列出了机组的各项重要指标, 包括一次风口尺寸、额定风量、水泵额定功率、一次风机总功率、二次风机总功率以及风机全压效率等参数。



图 2 实验台实物图

Fig.2 Physical picture of the test bench

表 1 AHU 测试机组性能参数

Table 1 Performance parameters of AHU test unit

一次风口尺寸/cm×cm	额定风量/(m³/h)	水泵额定功率/kW	一次风机全压/Pa	二次风机全压/Pa	风机全压效率/%
220×220	80000	3	320	200	80

2 基于 TRNSYS 搭建立管间接-机械制冷空调系统模型

TRNSYS 立管间接-机械制冷空调系统模型, 此模型的系统结构以图 2 所示的实验测试系统为参数系统, 搭建空调系统模型如图 3 所示, 图中与立管间接蒸发冷却器、DX 机械制冷模块相连接的粗线条是系统的主要部分。通过对机械制冷模块、负荷模块、气象模块、温控模块等主要模块的功能和参数设置进行分析, 搭建了完整的复合空调系统仿真平台。

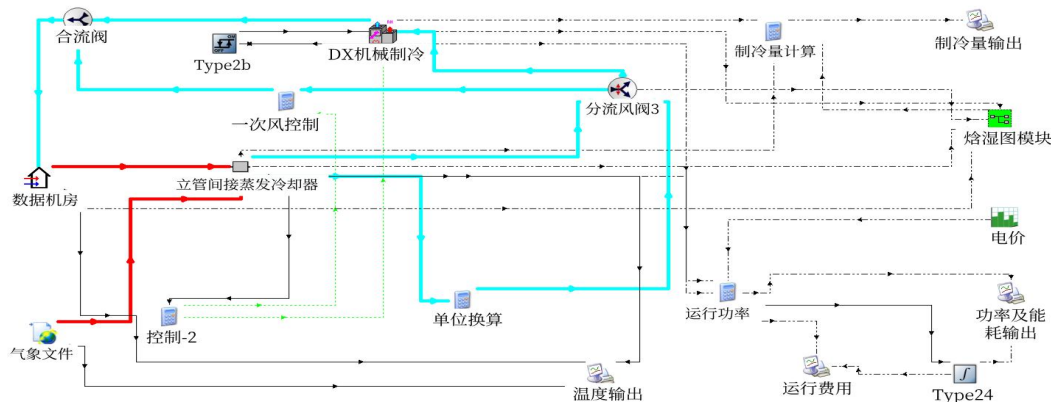


图 3 立管间接-机械制冷复合空调能耗模拟系统

Fig.3 Energy consumption simulation system of vertical pipe indirect-mechanical refrigeration composite air conditioning

系统干模式和湿模式的运行流程为：来自数据机房的回风（一次空气）→立管间接蒸发冷却器→分流阀→一次空气信号控制器→合流阀→数据机房，其中在干模式运行状态下，立管间接蒸发冷却器模块水泵不运行，在湿模式运行状态下，立管间接蒸发冷却器模块水泵运行并输出运行功率；系统混合模式的运行流程为：来自数据机房的回风→立管间接蒸发冷却器→分流阀→DX 机械制冷→合流阀→数据机房，混合模式下，立管间接蒸发冷却器模块的风机和水泵正常运行并输出相应的运行功率。

TRNSYS 中的立管间接-机械制冷空调系统的主要系统模块介绍如下所示：

（1）机械制冷模块：该模块根据数据中心负荷进行制冷调节，模块的输入侧需要根据运行流程由分流阀与其连接输入进风温度、含湿量、相对湿度以及风速等参数，输出侧通过合流阀输出处理后的出风参数。负荷侧的介质为室外空气，被处理的介质为来自数据机房的一次空气。假设换热过程无热损失且进出口的风速无明显变化。

（2）负荷模块：该模块模拟数据机房的冷负荷，将显热和潜热负荷转换为 TRNSYS 可用的温湿度参数，设定数据中心总负荷为 9000kW，输出的初始温度为 38.0℃、初始相对湿度为 50%，输入的一次空气通风温度为 25.0℃，根据负荷量和一次空气进出口温差计算得出一次空气质量流量为 554000kg/h。

（3）气象模块：该模块从外部天气数据文件中读取数据，以小于 1 小时的时间步长对数据进行插值，为其他组件提供环境温湿度参数，数据来源于 Weather 的代表城市天气。

（4）温控模块：TRNSYS 中的 Type2b 模块是一种温差控制器模块，它根据用户设定的温差上下限值，控制设备的启停。当两个温度输入（如一次空气实际温度和要求输出温度）之间的温差高于上限值时，模块输出“开”信号，启动设备；当温差低于下限值时，输出“关”信号，停止设备。这种控制逻辑可通过设置滞回区间（上下限的差值）有效防止设备频繁启动，保护设备并提高系统稳定性。

（5）绘图模块：Type65c 绘图模块则提供专业的数据可视化功能，支持生成多种图表类型和多

变量对比分析，并能导出标准格式图表，为系统性能评估和报告编制提供有力支持。这两个模块分别从智能控制和数据分析两个维度提升了系统的运行效率和可观测性。

此外，结合实测数据验证了模型的准确性，送风温度实测结果与模拟结果差距误差最大为 0.4℃，偏差率为 1.60%，回风温度模拟结果与实测结果误差最大为 0.5℃，偏差率为 1.32%。主要原因为模型理想化处理、实际机组运行的磨损和结垢及测试误差。尽管存在一定偏差，模型整体表现出较高的准确性和可靠性，可为复合空气处理机组的模拟研究和实际应用提供有力支持。

3 模拟分析

根据 GB 50174-2017《数据中心设计规范》和 T/DZJN 10-2020《数据中心蒸发冷却空调技术规范》^[10,11]规定的数据中心机房送风温度在 18.0~27.0℃之间，回风温度在 35.0~38.0℃之间，通过改变二次空气侧进风参数使一次空气侧空气参数保持在规范要求的范围内，且干模式、湿模式以及混合模式一次空气循环侧空气参数均保持一致。根据 GB 50189-2015《公共建筑节能设计标准》^[12]中代表城市建筑热工设计分区，选取了在各分区的典型城市严寒地区（长春）、寒冷地区（太原）、夏热冬冷地区（成都）、夏热冬暖地区（福州）、温和地区（昆明），利用 TRNSYS 软件对复合空调系统在不同气候分区下的代表城市的室外干湿球温度的全年变化、运行模式时长的分布、风机及机械制冷等设备的功率与能耗进行了详细评估及计算出各城市的制冷因子，对未来在不同气候区域使用复合空调系统提供科学的参考。下面以成都市为例对模拟过程进行叙述。

3.1 温度分析

3.1.1 成都市温度分析

图 4 展示了立管间接-机械制冷复合空调系统在数据中心运行的送回风温度以及成都市全年室外干湿球温度，其中，实线代表室外干球温度，划线代表室外湿球温度，双点划线代表数据中心回风温度，点划线代表送风温度。从图 4 中可以看出，复合空调系统在数据中心的全年运行，无论室外温度如何变化，送/回风温度都稳定在 25/38℃左右。成都市冬季干湿球温度大部分都分布在 0℃至

10℃ 之间, 最低干/湿球温度分别为 -2.08℃ /-2.73℃; 夏季干球温度大部分时间达到 30℃ 以上, 最高干球温度约为 34℃, 夏季干湿球温差平均约为 6℃。

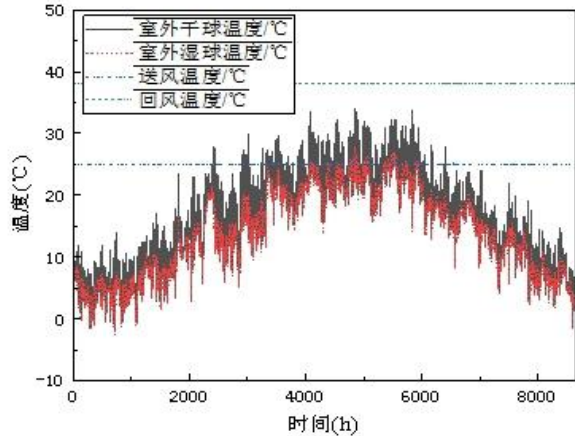


图 4 成都市全年干湿球温度及数据中心送回风温度

Fig.4 Annual dry and wet bulb temperatures and air return temperature of data centers in Chengdu

3.1.2 其他城市温度分析

对长春、太原等城市的全年干湿球温度及数据中心回风温度的统计数据如表 2 所示, 在本文所述的复合空调系统中, 送风温度为 25℃, 回风温度为 38℃。

表 2 其他城市全年干湿球温度及数据中心送回风温度
Table 2 Annual dry and wet bulb temperatures in other cities and supply and return air temperatures in data centers

城市	冬季 干/湿球温 度范围/℃	冬季 最低干/湿球 温度/℃	夏季 干球温度 范围/℃	夏季 最高干 球温度 /℃	夏季 干湿 球温 差/℃
长春	<0	-20~-25	8~30	33	10
太原	-18~0	-17.7/-18.7	25~38	36.9	7
成都	0~10	-2.08/-2.73	>30	34	6
福州	3~18	3.6/2.52	30~40	38.3	1
昆明	5~25	5.2/3.42	5~25	29	<5

3.2 运行模式时长分析

3.2.1 成都市运行模式时长分析

图 5 为三种运行模式全年运行时长图。如图 5 所示, 干模式累计全年运行时长为 4268.40 小时, 湿模式累计全年运行时长为 807.05 小时, 混合模式累计全年运行时长为 3684.55 小时。该系统干模式的运行时长约占全年运行时长的 48.73%, 混合模式的运行时长约占全年运行时长的 42.06%, 表明全年近一半的时间仅开启干模式就可以达到送风温度的要求。

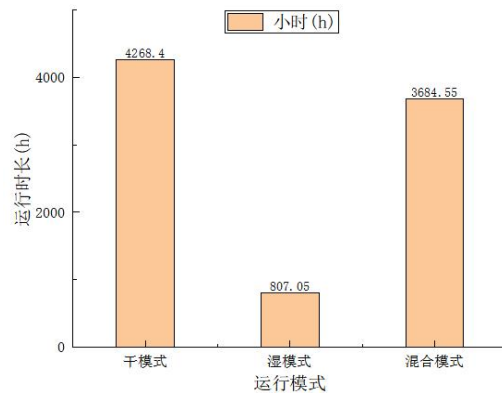


图 5 复合空调系统在成都市运行模式时长统计

Fig.5 Statistics of operation mode duration of the combined air conditioning system in Chengdu

3.2.2 其他城市运行模式时长分析结果

对复合空调在长春、呼和浩特、太原、西安等城市的运行模式时长占比统计数据如表 3 所示。

表 3 复合空调系统在其他城市运行模式时长占比
Table 3 Proportion of operating mode duration of composite air conditioning system in other cities

城市	干模式全年运 行时长占比/%	湿模式全年运行 时长占比/%	混合模式全年运 行时长占比/%
长春	65.81	13.93	20.26
太原	59.72	18.48	21.80
成都	48.73	9.21	42.06
福州	30.22	13.48	56.30
昆明	53.96	20.98	25.06

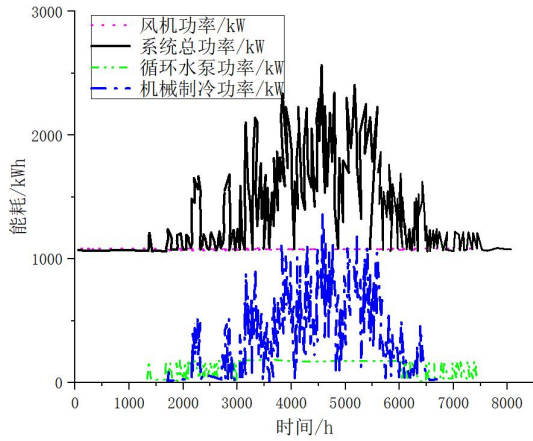
3.3 运行功率及能耗分析

3.3.1 成都市运行功率及能耗分析

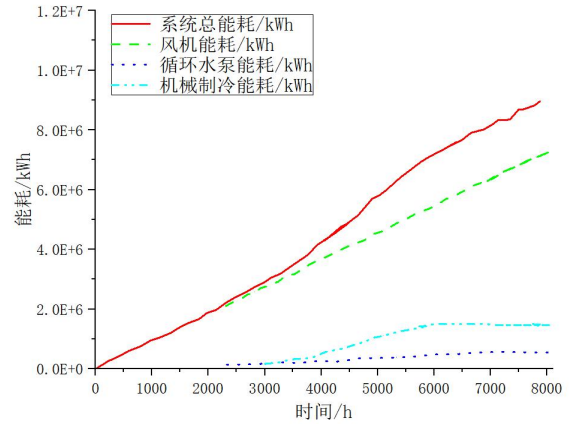
图 6 为复合空调系统在成都市的运行功率以及能耗模拟情况, 分别展示了风机、循环水泵、机械制冷以及系统的总功率和全年累计能耗, 并计算出制冷因子。其中风机的全年累计能耗为 928.56

万 kWh; 循环水泵的全年累计能耗为 56.37 万 kWh; 机械制冷的最大功率为 1612.81kW, 全年累计能耗

为 174.49 万 kWh; 复合空调系统全年累计能耗为 1159.42 万 kWh, 制冷因子为 0.201。



(a) 系统在成都市的运行功率



(b) 系统在成都市的运行能耗

图 6 复合空调系统在成都市的运行功率及能耗统计

Fig.6 Operation power and energy consumption statistics of the combined air conditioning system in Chengdu city

3.3.2 其他城市运行功率、能耗及运行费用分析

如表 4 所示为复合空调系统在长春、呼和浩特、太原、西安等城市的运行功率、能耗及运行费用统计, 复合空调系统中风机的全年累计能耗设为 928.56 万 kWh。

表 4 复合空调系统在其他城市的运行功率、能耗及运行费用统计

Table 4 Operation power, energy consumption and operation cost statistics of composite air conditioning system in other cities

城市	循环水泵的全年累计能耗/万 kWh	机械制冷最大功率/kW	机械制冷全年累计能耗/万 kWh	复合空调系统全年累计能耗/万 kWh	制冷因子
长春	27.16	1612.81	64.52	1020.24	0.193
太原	29.22	1159.73	64.80	1022.58	0.194
成都	56.37	1612.8	174.49	1159.42	0.201
福州	75.46	1622.79	308.91	1312.94	0.222
昆明	33.59	657.88	36.39	998.55	0.161

4 结论

本文根据城市建筑热工设计分区来选择了典型城市: 严寒地区(长春)、寒冷地区(太原)、夏热冬冷地区(成都)、夏热冬暖地区(福州)、温和地区(昆明), 利用 TRNSYS 软件对复合空调系统在典型城市的数据中心应用时运行模式时长、系统能耗进行了分析, 主要结论如下:

(1) 在严寒和寒冷地区, 冬季干湿球温度在零度以下, 夏季干湿球温差比较大, 表明冬季自然冷源供冷能力强大且夏季的蒸发冷却潜力巨大; 复合空调系统干模式运行时长约为 60%, 全年近六成时间仅需自然冷却即可满足需求。由于长春与太原气候湿度条件有所差异, 故湿模式使用具体时长需要根据所处地区实际的湿负荷进行调整。制冷因子约为 0.19, 复合空调系统的全年累计能耗在 1023kWh 内, 表明复合空调系统在严寒和寒冷地区可以充分利用严寒气候的天然冷源, 大幅降低机械制冷依赖, 节能效果显著。

(2) 在夏热冬冷和夏热冬暖地区, 气候呈现高温高湿特征, 夏季除湿需求显著, 因此复合空调系统以混合模式主导, 干模式运行时长与寒冷与严寒地区相比显著降低, 反映出这些地区需要同时应对温度和湿度调节的复合负荷时间大幅增加。在夏热冬冷和夏热冬暖地区, 制冷因子在 0.201~0.222 之间, 复合空调系统的全年累计能耗在 1159~

1313kWh 之间, 表明复合空调系统在此气候条件下通过结合蒸发冷却与机械制冷的运行策略才能够更好地满足制冷要求, 实现高效运行。

(3) 在温和地区, 全年温差较小, 四季如春, 符合温和地区建筑热工设计要求相对较低; 系统干模式的运行时长约占全年运行时长的 54%, 混合模式约占 25%, 机械制冷需求较低, 全年累计能耗仅为 998.5kWh, 节能潜力突出, 制冷因子为 0.161, 表明在温和地区, 机械制冷与间接蒸发冷却复合空调系统具有显著适用性。

参考文献:

- [1] 陈佳. 数据中心绿色节能技术探究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (11): 111-113.
- [2] 黄翔, 屈名勋. “双碳”目标下绿色数据中心冷却关键技术路径的探讨[J]. 制冷与空调, 2022, 22(3): 1-10.
- [3] 雷致博, 闵韵然, 齐浩, 等. 数据中心一体化风侧间接蒸发冷却空调系统的研究综述[J]. 制冷与空调, 2024, 24(7): 60-70.
- [4] 武苗苗, 黄翔, 史东旭, 等. 不同运行模式下间接蒸发冷却空调的能耗分析[J]. 西安工程大学报, 2022, 36(4): 84-91.
- [5] 高帅, 孙铁柱, 周理, 等. 立管间接蒸发冷却器与机械制冷复合空气处理机组干湿工况运行模式能耗分析[J]. 制冷与空调, 2024, 38(2): 177-181.
- [6] 贺红霞, 黄翔, 何华明, 等. 数据中心用露点间接蒸发冷却与机械制冷复合空调的实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(6): 71-76.
- [7] 陈瑞, 许家翔, 曹军. 数据中心间接蒸发冷却复合空调系统的节能运行分析[J]. 暖通空调, 2024, 54(10): 113-119.
- [8] 陈梦, 黄翔, 金洋帆, 等. 数据中心用间接蒸发冷却空调机组性能测试及适用性分析[J]. 流体机械, 2022, 50(9): 7-13.
- [9] 崔科, 谢若怡, 檀志恒, 等. 间接蒸发冷却数据中心余热利用技术应用分析[J]. 暖通空调, 2023, 53(7): 120-125.
- [10] GB 50174-2017, 数据中心设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [11] T/DZJN 10-2020, 数据中心蒸发冷却空调技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [12] GB 50189-2015, 公共建筑节能设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [13] 陈焕新, 程亨达. 数据中心及超算中心冷却技术研究及应用进展[C]. 2022 年双碳背景下中国制冷技术研究及应用进展论坛”会议论文集, 2023: 50-55.