

水蓄冷式空调系统运行特性分析研究

徐建峰¹ 丁明星¹ 李新辉¹ 王猛¹ 郑国涛¹ 于庆磊¹ 殷远东²

1. 青岛云创环境科技有限公司; 2. 新疆大学机械工程学院

摘要: 本文研究了水蓄冷空调系统在青岛地区某办公建筑中的应用及其能效表现。通过试验, 测量并分析了系统蓄冷端和释冷端的进回水温度, 揭示了系统在蓄冷和释冷过程中的运行稳定性。随后, 利用 TRNSYS 仿真平台建立了水蓄冷与常规空调系统的模型, 并对夏季典型工况下水箱温度进行了模拟。结果表明模型预测值与实际测量值的最大误差为 10.2%, 相对误差为 1.96%, 验证了仿真平台的准确性。

关键词: 水蓄冷; 实测分析; TRNSYS 仿真; 运行费用

随着人们对室内环境舒适度要求的不断提高, 空调的广泛应用已成为建筑能耗的主要来源之一。研究表明, 空调系统在建筑中的能耗占据了较大比例^[1]。与此同时, 空调使用的高峰期常常导致电力供应的紧张。因此, 储能技术作为一种有效的错峰填谷手段, 已在多个领域得到广泛应用^[2-4]。众多研究表明, 结合科学管理策略的储能技术能够带来显著的社会效益和经济效益^[5,6]。目前, 水蓄冷空调系统因其显著的节能优势, 已广泛应用于实际工程中。该系统通过与传统空调系统的结合, 利用夜间低电价时段储存冷量, 在白天高峰期释放, 以满足负荷需求。这一过程中, 尽管由于非高峰时段更多的能量用于负荷转移, 导致总体冷负荷需求消耗有所增加^[7], 但通过优化设计和合理的运行策略, 可以有效降低系统的能源成本^[8]。SEBZALI 等^[9]研究了多种运行策略对空调系统的影响, 包括部分蓄冷(负荷需求)、部分蓄冷(功率需求限制)和满负荷交替运行策略。该研究表明, 采用适当的蓄冷策略能够在满足空调

需求的同时, 优化系统运行。柴梦等^[10]通过比较冷水机组单独供冷、蓄冷水罐优化供冷及优先使用蓄冷水罐 3 种运行策略, 得出结论为水蓄冷空调系统在优化运行策略下, 能够在移峰填谷和经济性方面优于冷罐优先运行策略。这些研究为水蓄冷空调系统的优化设计和运行策略提供了理论依据, 并进一步证明了其在节能减排和运行费用控制方面的优势。

水蓄能空调系统是一种高效的能源利用方案, 依赖水的高比热容特性, 通过储水和热交换技术实现冷/热能的存储与调节。这种技术广泛应用于商业建筑、住宅、工业领域及交通工具。它能够提升空调系统的能源效率, 减少峰值电力需求, 从而降低运行成本和碳排放。在工业领域, 尤其是对温控要求高的场所如数据中心, 水蓄能空调可以提供精准的温控, 并通过废热回收提升能源利用率。

水蓄能空调的未来发展趋势主要集中在智能化、绿色环保和高效材料的应用上。智能化将通过物联网和人工智能提高系统性能, 实现精准调节、远程

控制和实时监控。绿色环保方面, 水蓄能空调将与可再生能源结合, 助力低碳、节能目标的实现。同时, 新型高效热交换材料和蓄能材料的研发将进一步优化系统能效, 提升储能密度和使用寿命。尽管如此, 水蓄能空调的推广仍面临储能容量限制、初期成本高、与现有系统兼容性差和维护复杂等挑战。未来, 模块化设计将为系统的灵活性提供解决方案, 而全生命周期优化和全球推广有望加速其应用, 特别是在能源短缺和环保需求日益增长的地区。图 1 展现了对水蓄冷空调系统的全面概述。

目前对冰蓄冷系统的设计和运行策略的研究主要集中在理论分析和试验上^[11-13]。实际工程中对冰蓄冷运行数据的分析比较少。本文以青岛市某工业园区办公建筑为研究对象, 区别于现有研究, 搭建了可灵活调控储能水罐的空调系统, 对水蓄冷系统投入使用后, 从蓄冷端和释冷端水温变化及系统各单元功率方面的运行数据进行了监测和分析。同时建立水蓄冷空调系统模型, 对模型进行验证, 并利用模型对整个供冷季各部件功率、能耗和 COP 分析, 同时与

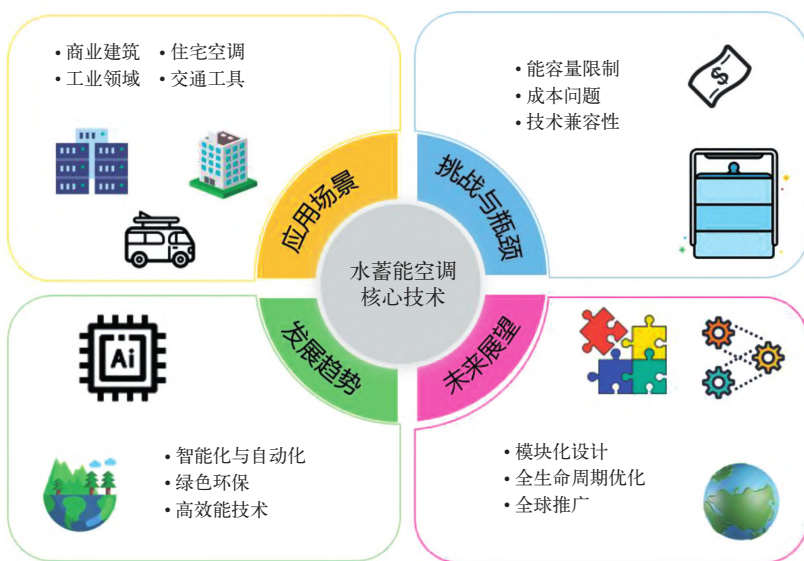


图1 水蓄冷空调系统的全面概述

常规空调进行对比分析，以期获得水蓄冷空调系统的运行特性。

1 系统原理及模型建立

1.1 系统原理

水蓄冷空调系统由换热器、水蓄冷箱、制冷机组、智能化控制系统和水泵等设备组成，主要分为四个主要部分：制冷部分、蓄冷部分、释冷部分和控制部分，如图2所示^[14]。水蓄冷空调系统以建筑室内为供冷末端，室外为制冷机组、蓄冷罐和冷源换热端，通过制冷系统和储能系统联合运行实现建筑室内制冷需求。该系统的运行模式为：在夜间电力低谷时段，制冷机以全负荷运行，将冷量储存在6~8℃的冷水槽中；在白天空调使用期间，显热控制系统通过板式换热器将储存的冷量以高温冷水形式释放，供冷末端使用^[15]。水蓄冷空调系统的优势包括两个方面。首先，它们可以促进电网中的调峰，通过在非高峰时段（“谷值”）储存冷负荷需求并在高峰时段（“高峰期”）利用冷负荷需求来有效平衡负载。其次，通过利用区分高峰、非高峰和中峰（或“固定”）费率的分时电价政策，这些系统可以显著降低空调的运营成本^[16]。水蓄冷空调系统能在多大程度上发挥其优势，不

仅取决于其设计的合理性，还取决于其运行模式的适宜性。

1.2 数学模型

根据定义，机组的能效比（COP）为机组的有效制冷或制热量与其输入功率的比值，单位为kW/kW，COP计算公式为^[17]：

$$COP_H = \frac{Q_H}{N_i} \quad (1)$$

式中： COP_H ——主机的制冷/制热性能系数；

Q_H ——主机的平均制热或制冷量，kW；

kN_i ——主机的平均输入功率，kW。

$$Q_H = V\rho C_p \Delta t_w / 3600 \quad (2)$$

式中： V ——系统冷冻水平均流量，m³/h；

Δt_w ——系统冷冻水进、出口之间的温差，℃；

ρ ——系统冷冻水密度，kg/m³；

C_p ——系统冷冻水定压比热，kJ/(kg·℃)。

额定工况下，水泵的效率将由下式计算所得^[18]：

$$\eta_z = \frac{V_{ED} \Delta p_{ED}}{P_{ED}} \quad (3)$$

式中： η_z ——水泵效率；

V_{ED} ——液体的体积流量；

P_{ED} ——水泵额定进出口液流压差；

P_{ED} ——水泵额定总功率。

制冷机组能耗可由下式计算得出^[18]：

$$P = \frac{Q}{\eta_0} \times x \quad (4)$$

$$Q_r = Q_m + P$$

式中： P ——制冷机组实时耗功率，kW；

Q_m ——制冷机组实时冷负荷，kW； x ——机组满载功率百分数；

Q_r ——制冷机组实时排热量，kJ/h。

单位供能消耗费用（ $C_{ec,u}$ ）由下式计算得出^[19]：

$$C_{ec,u} = \frac{C_{ec}}{Q_{sec}} \quad (5)$$

式中： Q_{sec} ——空调系统的累计供能量，kW·h；

C_{es} ——释能周期内的能耗费用，元。

单位蓄能消耗费用（ $C_{ec,ucd}$ ）由下式计算得出^[19]：

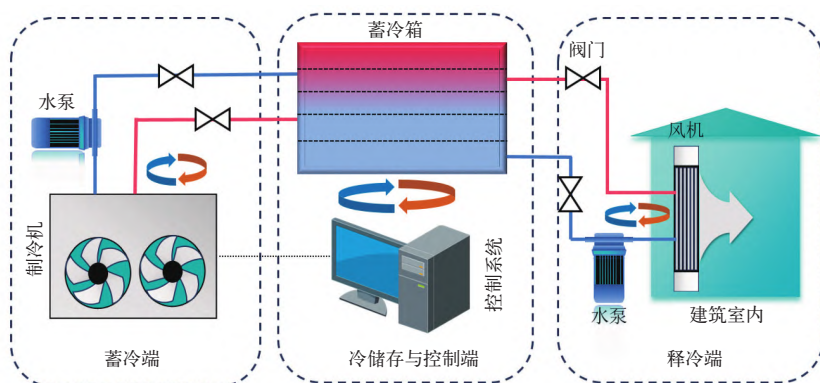


图2 水蓄能空调的原理示意图

C_{ec,ued} = \frac{C_{ec,es}}{Q_{ed}} = \frac{N_{pes} \cdot P_v}{Q_{ed}} \leq \frac{0.8 \cdot P_v}{SCOP_0} \quad (6)

式中：C_{ec, es}——释能周期内的蓄能所产生的能耗费用，元；

Q_{ed}——蓄能装置的释能量，kW·h；

P_v——当地谷段电价，元/kW·h，其中P_v为当地平均电价标准限值要求，元/kW·h；

SCOP₀——常规空调系统的冷热源性能系统基准值。

1.3 模型建立

1.3.1 建筑概况及冷负荷统计

本研究以青岛市某办公建筑为例搭建 TRNSYS 模拟仿真平台。该建筑层高层为 3 m，总面积约为 300 m²，并在东墙和北墙开窗。采用 Metconorm 8 软件生成的青岛市天气文件作为天气依据来计算建筑室内冷负荷。由表 1 可知，青岛市夏季用电峰谷时间为：谷时间段为 0：00～6：00，尖峰时间段为 17：00～22：00。故设定水蓄冷系统的冷水机每日运行时间为 0：00～17：00，释冷从 8：00～22：00。图 3 为建筑供冷季（5～10 月）的逐时动态冷负荷。由图 3 可知，夏季建筑瞬态冷负荷最大值为 11.9 kW，累计总冷负荷为 12 228.11 kW·h。

1.3.2 系统模拟仿真建立

根据图 1 水蓄冷空调系统，建立如图 4 所示的仿真模型。建立的模型主要利用 TRNSYS 软件中的空气源热泵、风机盘管、制冷机组及温差控制器等模块。其中放冷端、制冷段、储能系统之间通过管道、泵和阀门进行连接组成系统。全年中的第 2 880～6 552 h 是建筑全年冷负荷需

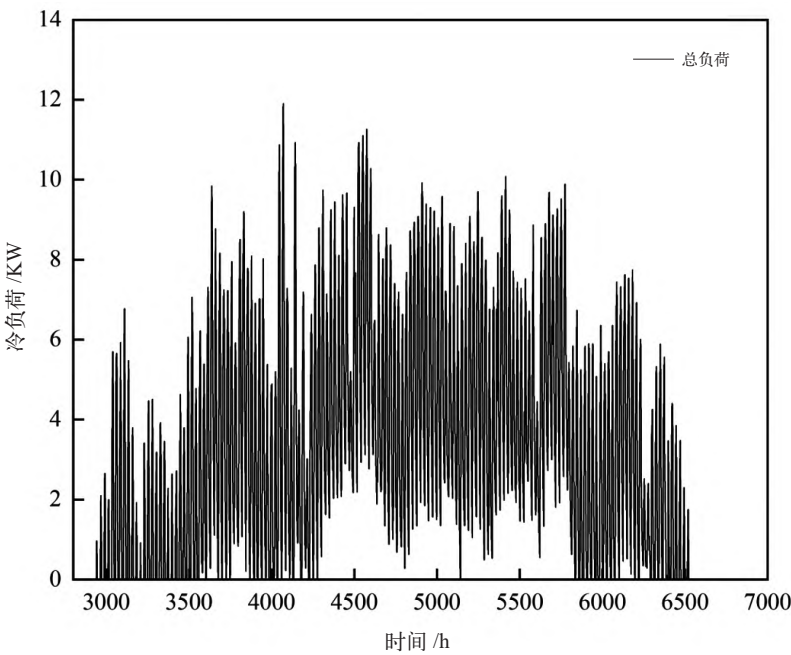


图 3 建筑供冷季的逐时动态冷负荷

求最大所在的时间段。为此，选择此时间段内进行供冷季模拟，并选取 8 月 31 日进行单日模拟选择，以探究水蓄能系统制冷水温、放冷水温、释能特性波动情况及两种系统的能耗问题。另外，将本研究中将建立常规空调系统和水蓄能空调系统进行了对比，其中常规空调系统仿真流程如图 5 所示。

2 讨论

2.1 结果与分析

在水蓄冷空调系统的蓄冷过程中，冷水机的进出水温度及水泵的频率和流量变化曲线如图 6 所示。根据图 6 中的冷水机水泵流量与频率曲线，冷水机组的运行时间为 00:00～17:00。在 8:00～17:00，冷水机水泵的流量和频率曲线出现波动，主要原因是此阶段处于释冷阶段。然而，冷水机水泵的流量始终维持在约 2.9 m³/h 左右，且水泵频

率保持在 41Hz 左右的稳定状态。在用电高峰期，即 17:00～22:00，冷水机组停止运行，冷水机水泵流量和频率曲线趋近于零。如图 6 所示，水箱内的初始温度稳定在约 24℃。随着蓄冷过程的开始，冷水机组的进回水温度逐渐下降。在 8:00 时，冷水机回水温度达到最低点 5.98℃，此时进水温度为 12℃，进回水的温差保持在约 5℃。这表明蓄冷系统能够有效降低水温，并保持恒定的温差以满足系统的制冷需求。

然而，在 8:00 之后，蓄冷罐进入释冷阶段，冷水机组的进回水温度出现上下波动的现象。这种波动的主要原因是蓄冷系统内水流的复杂性，具体表现为进水温度和回水温度分别出现在系统的不同侧面。此外，蓄能水箱具有自然分层的特点，这导致了水箱内的温度分布不均，水流的存在加剧了这一现象。因此，进水和回水的温度波动是由水箱内水流的动态变化和水箱内温度的不均匀分布所引起的。尽管存在温度波动，冷水机组的进回水温度差始终维持在约 5℃以内，表明冷水机组的功率足以满足系统的制冷量需求。在 17:00 以后，由于青岛市进入用电尖峰期，冷水

表 1 青岛各季节电力需求时段

时段\季节	春季	夏季	秋季	冬季
谷时段	10:00～15:00	00:00～06:00	10:00～15:00	10:00～15:00
平价时段	—	—	—	—
峰时段	17:00～22:00	16:00～22:00	16:00～21:00	16:00～21:00
尖峰时段	17:00～20:00	17:00～22:00	17:00～19:00	16:00～19:00

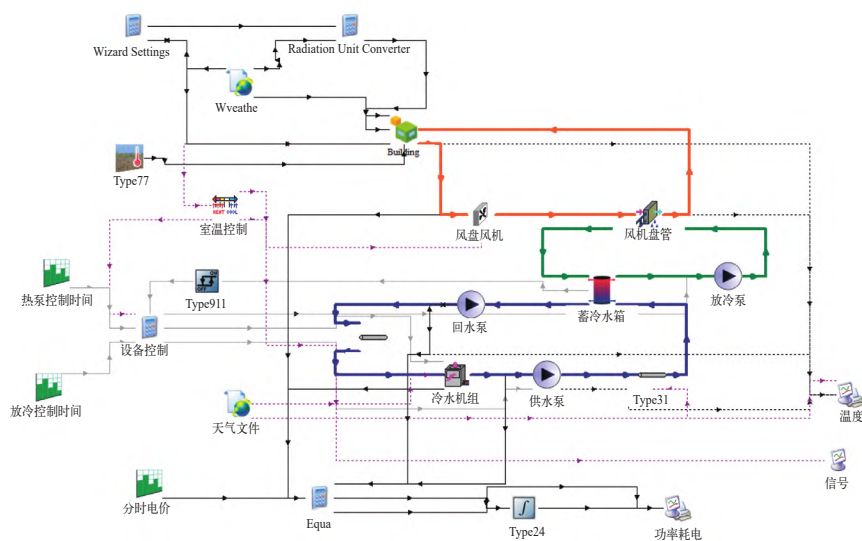


图4 水蓄冷空调系统仿真流程图

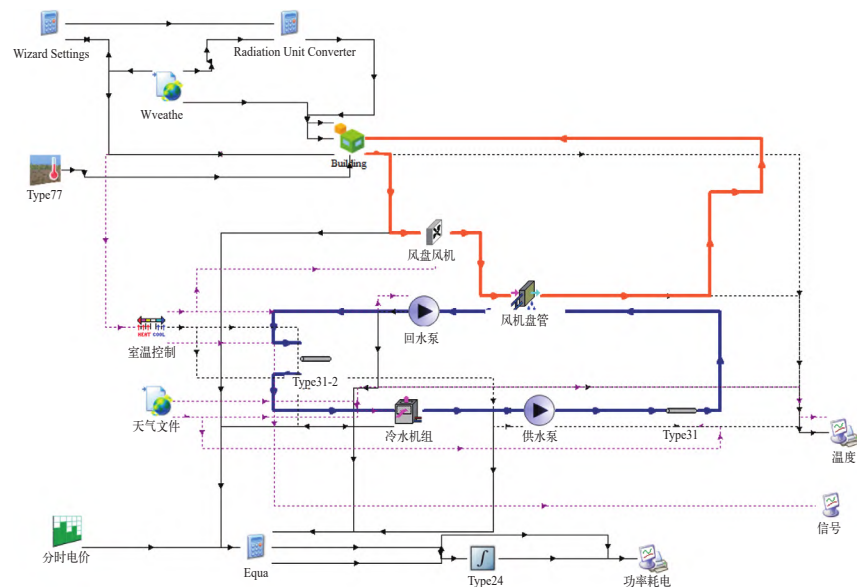


图5 常规空调系统仿真流程图

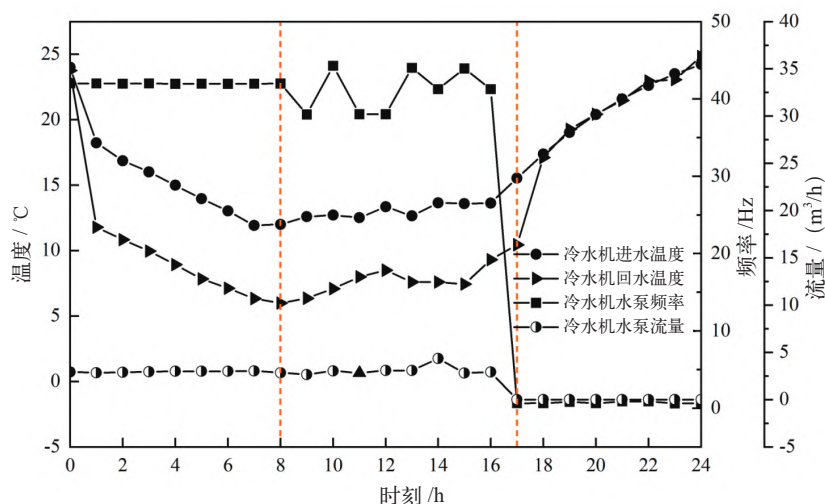


图6 典型日制冷端温度运行变化

点位于接近蓄能水箱的管道附近,因此测得的进回水温度与水箱内的温度几乎一致。随着时间推移,水箱温度逐渐升高,并最终趋向于 24°C ,表明蓄冷过程已基本结束,水箱的热储存已接近饱和状态。

在水蓄冷空调系统中,释冷管道的进出水温度及供水压力的变化曲线如图7所示。从图7中的水泵压力曲线可以看出,在08:00时,释冷端水泵的压力约为0 MPa,随后升高至约3.1 MPa,表明此时系统处于蓄冷箱释冷阶段。根据图6的数据,在08:00时,释冷端的供水温度为 15°C ,回水温度为 18.8°C 。在08:00~17:00的时间段内,系统的供能模式为蓄冷与供冷同时运行,此时用户侧水泵以定频运行,释冷端的供水温度和回水温度逐渐上升。该上升趋势的原因在于释冷开始后,回水管道和供水管道位于同一侧,水箱内的初始水温与释冷端回水完全混合,导致供水温度高于水箱原有水温,且呈现缓慢上升的趋势。此时,建筑负荷逐渐增加,进一步加剧了这一温度上升。在17:00时之后,冷水机组停止工作,此时释冷端的供水温度为 18°C ,回水温度为 22°C 。回水温度上升速度较快,其原因在于冷水机组停止运行,系统仅依赖蓄冷箱供冷。当用户需求冷量超过板换的最大换热能力时,由于用户侧供水流量保持不变,供水温差只能增大,从而导致回水温度较上午更快速上升。随着时间的推移,蓄冷箱中的冷量逐渐被消耗,箱内温度逐步升高。至22:00时,整个系统停止工作,此时释冷端的供水温度为 24.7°C ,回水温度为 25.2°C ,仅存在约 1°C 的温差,表明蓄冷箱内存储的冷量已基本耗尽。以上说明在17:00时冷水机组停止运行后,蓄冷箱储存的冷量足以满足夜间室内的冷负荷需求,有效避开了工业园区的电力尖峰负荷时段。

2.2 仿真结果与分析

选择2024年供冷期某一天的蓄冷

时间段（从 0:00 ~ 24:00）进行分析。在该仿真平台中，每次记录的实时监测间隔为 60 min，即模拟步长为 60 min。根据提供的模拟数据与实测数据，我们将重点分析其一致性、误差范围及模型的可靠性。图 8 展示了水蓄冷空调系统逐时平均水箱温度变化的对比结果。通过计算，我们得出模型预测温度的最大误差为 10.2%。在 9:00 ~ 17:50 时间段内，模拟值与实测值之间的相对误差仅为 1.96%，这表明模拟值与实测值之间的差距非常小，且模型预测曲线与实际运行曲线几乎完全吻合。通过对水蓄能空调系统的实测数据与模拟数据进行对比分析，我们可以得出结论：该释能模型在该时间段内的预测准确性较高，相对误差为 1.96%，且该误差范围处于可接受的范围之内，进一步验证了模型的可靠性与实用性。

图 9 为水蓄冷空调系统在既定运行方案下的室温与湿度波动情况。在整个供冷季运行中，系统将室内温度在 22.1 ~ 32.8 °C 内波动，而室内相对湿度则在 22% ~ 86.6% 内波动。图 10 为水蓄冷空调系统运行逐时 COP，图 11 为常规空调系统运行逐时 COP。由图 10 和图 11 可知，水蓄冷系统热泵的 COP 保持在 3.6 左右，而常规系统热泵的 COP 保持在 3.2 左右。这是由于水蓄能空调系统能够在高负荷期间优化冷却需求的供应，避免了传统空调系统在负荷波动较大的情况下频繁起停所带来的效率损失，而常规冷水机组通常需要在负荷变化较大时频繁调节运行状态，效率较低。水蓄能系统则通过平衡负荷、降低冷水机组的运行负荷波动，从而提高了整体系统的 COP。

图 12a ~ 图 12c 展示了仿真建模的水蓄能空调系统在各个部件功率和能耗方面的运行情况，包括风机、水泵和制冷机组的具体能耗数据。在夏季的运行期间，水蓄冷系统的运行模式如下：冷水机组的每日运行时间设

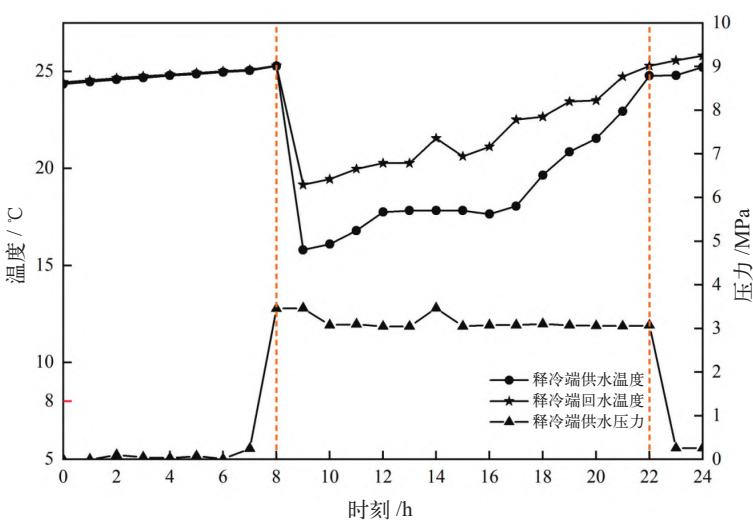


图 7 典型日释冷端温度运行变化

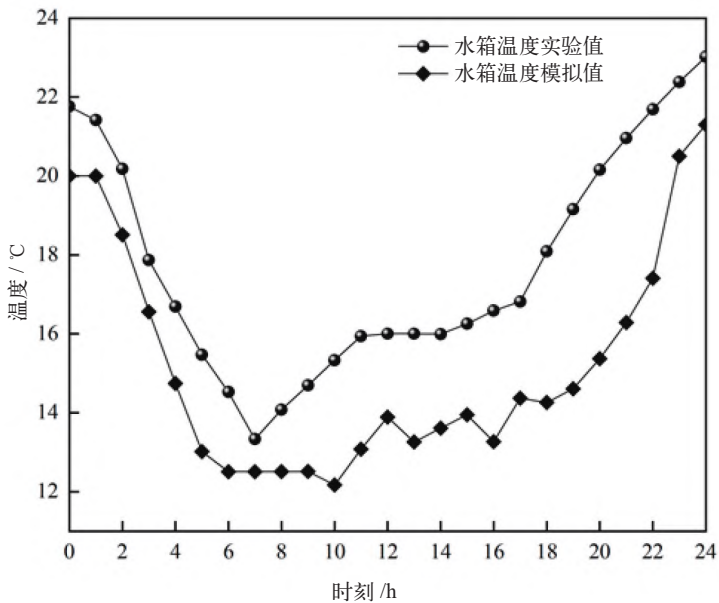


图 8 水蓄冷空调系统蓄能时水箱温度的模拟值和实测值

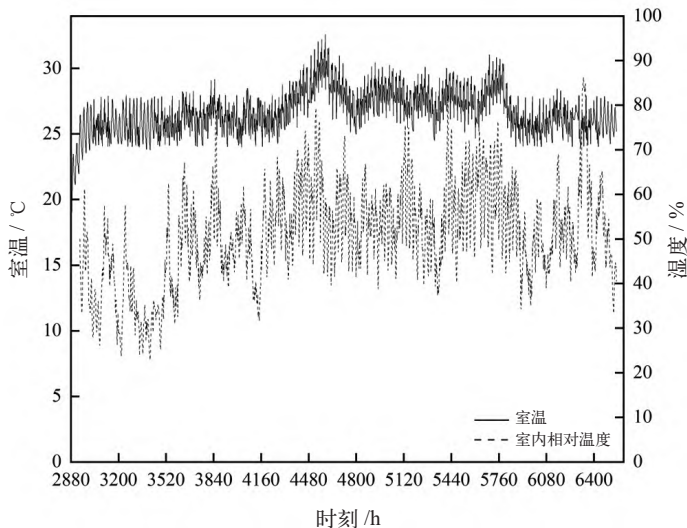


图 9 冷冻水温为 7°C 时室温与湿度波动情况

定为 0:00 ~ 17:00, 而释冷过程则从 8:00 持续到 22:00, 能够满足每天的制冷需求。在这一时间段内, 系统的各个组件的能耗数据如下: 风机的总能耗为 4 141.4 kW · h, 水泵的能耗为 1 247.2 kW · h, 而制冷机组的总能耗则为 5 032.3 kW · h。通过这些数据, 我们可以看出水蓄能空调系统在运行期间各部件的能耗分布。进一步分析图 12 d 显示了常规空调系统与水蓄能空调系统在夏季工况下的运行费用对比。从图中可以看出, 7 月和 8 月由于冷负荷需求较大, 系统的运行费用显著高于其他月份。这是因为在高温时段, 冷负荷需求急剧增加, 常规空调系统需要持续高强度运行, 从而导致了较高的电力消耗和费用。整体来看, 在整个夏季 (5 ~ 10 月) 的运行期间, 常规空调系统的总运行费用为 12 241.5 元, 而水蓄冷空调的运行费用则仅为 5 415.0 元, 相较于常规空调系统, 节省了约 55.7% 的费用。这一结果表明, 水蓄冷空调系统在高温时段能够有效平衡负荷, 减少了尖峰时刻的电力需求。

3 结论

本文对水蓄冷空调系统进行了试验与模拟研究, 对典型日水蓄冷空调系统的蓄冷段和释冷端进水温度和水泵进行分析, 并且建立仿真模型, 通过对整个供冷季进行模拟并与常规空调系统进行运行费用对比。得到结论: 1) 水蓄冷系统在蓄冷和释冷阶段运行稳定, 冷水机组在蓄冷阶段保持 5℃ 温差, 释冷端温差保持不变, 停止工作后, 水箱能基本维持电尖峰时供冷; 2) 模型预测的水箱温度与实际测量值的最大误差为 10.2%, 相对误差为 1.96%, 验证了模型的高可靠性与实用性。同时, 水蓄冷系统的热泵 COP 为 3.6, 优于常规空调系统的 3.2, 表现出较好的能效; 3) 水蓄冷系统的运行费用为 5 415.0 元, 比常规空调系统的 12 241.5 元低 55.7%, 具有显著的经济优势。

参考文献:

- [1] 曾石. 中央空调蓄冷技术对电网负荷的优化 [J]. 电工技术, 2000(3):55.
- [2] LIN H, LI X, CHENG P, et al. Thermoeconomic evaluation of air conditioning

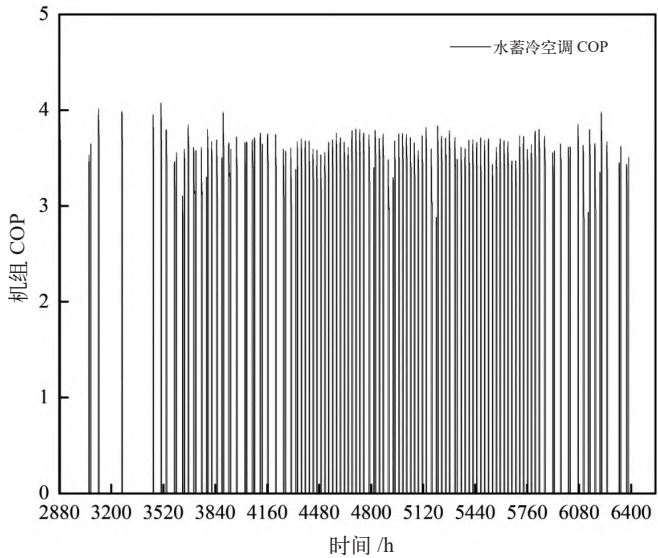


图 10 水蓄冷冷水机组供冷季 COP 的波动情况

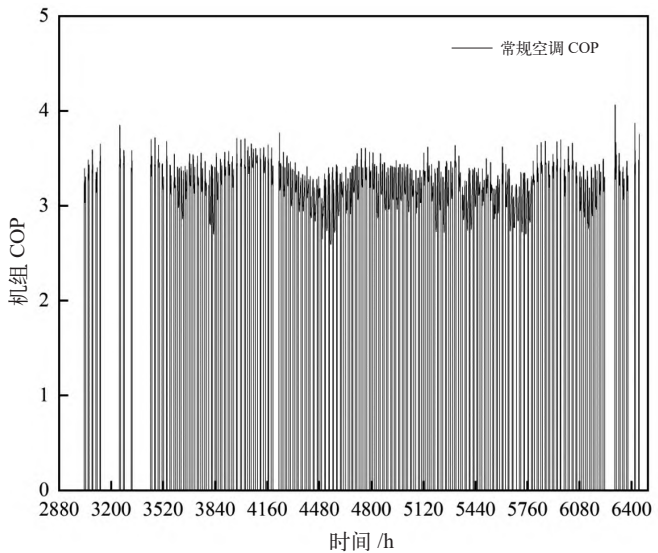


图 11 常规冷水机组供冷季 COP 的波动情况

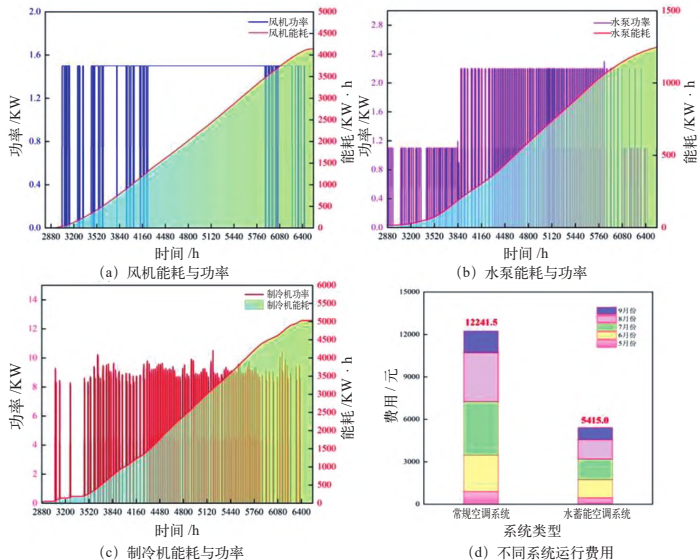


图 12 各部件运行能耗与功率和费用对比

- system with chilled water storage[J]. Energy conversion and management, 2014, 85: 328-332.
- [3] 李锦堂, 孙宗宇, 杜思存, 等. 基于全年逐时动态仿真的蓄能空调系统容量优化配置分析[J]. 暖通空调, 2023, 53(05): 51-58.
- [4] 李卫兵. 同方股份有限公司蓄能业务竞争战略研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [5] SAFFARIA M, GRACIA A D, FERNÁNDEZ C, et al. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system[J]. Applied Energy, 2018, 211: 604-616.
- [6] RISMACHI B, SAIDUR R, MASJUKI H H, et al. Energy and exergy analysis of cold thermal energy storage[J]. Energy and Buildings, 2012, 50: 347-354.
- [7] ZHANG M M, HE M L, WU Y X, et al. Analysis on the operation of ice storage air conditioning system in practical engineering[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing, 2020, 566: 012014.
- [8] 郑尚志. 水蓄冷空调在大型商场中的节能效益显著[J]. 上海建设科技, 2006(4): 7-10.
- [9] SEBZALI M J, RUBINI P A. The impact of using chilled water storage systems on the performance of air cooled chillers in Kuwait[J]. Energy and Buildings, 2007, 39(8): 975-984.
- [10] 柴梦. 水蓄冷空调系统运行策略优化分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [11] ROSIEK S, GARRIDO F J B. Performance evaluation of solar-assisted air-conditioning system with chilled water storage (CIESOL building)[J]. Energy conversion and management, 2012, 55: 81-92.
- [12] DE FOREST N, MENDES G, STADLER M, et al. Optimal deployment of thermal energy storage under diverse economic and climate conditions[J]. Applied energy, 2014, 119: 488-496.
- [13] 贾云飞. 基于实测的水蓄冷系统分析及水蓄冷罐研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- [14] GUO M, LV R, MIAO Z, et al. Load forecasting and operation optimization of ice-storage air conditioners based on improved deep-belief network[J]. Processes, 2024, 12(3): 523.
- [15] CHEN Z S, QI X G, CHENG W L, et al. A theoretical study of new-style cool storage air-conditioning systems with high-temperature water[J]. Energy and buildings, 2006, 38(2): 90-98.
- [16] 任亮. 水蓄冷空调系统布水器优化设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [17] 卞浩然, 马广兴, 王志颖, 等. 基于 Trnsys 的太阳能热泵苜蓿干燥系统优化研究[J]. 节能, 2024, 43(2): 31-34.
- [18] 孙茂锐. 水蓄能能源站运行优化策略研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [19] 王宇波, 全贞花, 靖赫然, 等. 多能互补协同蓄能建筑供能系统性能研究与评价[J]. 建筑科学, 2021, 37(12): 56-61+110.

“**走进标杆**”



机械工业信息研究院

流程工业

PharmaTEC
制药业

工业纪实类视频节目《走进标杆》

深入解读制造业领域的技术和管理创新

2025年我们将走进:

- 科技创新型企业
- 数字化和智能化企业
- 传统能源企业转型
- 新能源和可再生能源企业
- 技术装备制造企业
- 绿色化工和材料企业

广告