

中央空调系统动态蓄冰改造为静态蓄冰的技术路径与工程实践研究

叶景游

(深圳恒丰物业管理有限公司)

【摘要】在全球能源转型与“双碳”目标推动下，建筑暖通空调系统节能改造成为关键议题。文章先系统对比动态蓄冰与静态蓄冰技术的核心原理、设备特性及技术优劣，明确动态改静态的技术逻辑与核心方向，再以深圳财富港写字楼为工程实践，详述改造的可行性分析、系统优化设计、工程实施关键技术及综合效益，为既有建筑冰蓄冷系统改造提供理论与实践参考。结果表明，改造后系统COP提升19.3%，年节约电费60万元，成本效益比达2.37，实现了节能与经济收益的协同提升。

【关键词】中央空调；动态蓄冰；静态蓄冰；节能改造；技术路径

中图分类号：TU831.3

DOI：10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.111

Study on Technical Path and Engineering Practice of Transforming Dynamic Ice Storage into Static Ice Storage in Central Air-Conditioning Systems

YE Jing-you

(Shenzhen Hengfeng Property Management Co., Ltd.)

【Abstract】Under the promotion of global energy transition and "dual carbon" goals, energy-saving renovation of building HVAC systems has become a key issue. This paper takes Shenzhen Fortune Harbor Office Building as the engineering carrier to study the technical path and practice of transforming the central air-conditioning dynamic ice storage system into a static ice storage system. By comparing the principles and equipment differences between dynamic and static ice storage technologies, analyzing technical difficulties in renovation, the paper proposes optimized design schemes including equipment upgrading, pipe network optimization, and intelligent control, and realizes project implementation combined with modular installation technology. The results show that after renovation, the system's COP increases by 19.3%, saving an annual electricity fee of 600000 yuan and achieving a cost-benefit ratio of 2.37, which provides theoretical and practical references for the renovation of ice storage systems in existing buildings.

【Keywords】central air conditioning; dynamic ice storage; static ice storage; energy-saving renovation; technical path

1 引言

1.1 研究背景

建筑领域是能源消耗重点领域，据国际能源署（IEA）2023年数据显示，建筑能耗占全球终端能源消费的36%。其中暖通空调系统能耗占比高达40%~60%，其在建筑节能工作中的核心地位尤为凸显。

冰蓄冷技术作为暖通空调系统节能的重要技术路径，被广泛应用于商业建筑，但动态蓄冰系统能耗高、维护难、运行稳定性差等问题，亟需通过技术升级实现效能提升。在此背景下，将动态蓄冰系统改造为静态蓄冰系统成为既有建筑暖通空调节能改造的重要方向。

1.2 研究意义

首先，可为解决动态蓄冰系统固有缺陷提供针

对性方案。通过技术升级改造，可显著降低系统能耗、提升能源利用效率，同时简化系统结构、降低设备故障率与维护成本，增强系统可靠性与稳定性。其次，可为同类工程提供可复制的改造经验。粤港澳大湾区及其他地区分布着大量配备老旧冰蓄冷系统的既有建筑，本研究的技术路径和实践范式可为此类建筑的节能改造提供科学指导。

2 冰蓄冷技术体系对比

2.1 动态蓄冰技术原理与技术短板

动态蓄冰技术借助制冷剂与水直接热交换，结合特定工艺设备促使水快速生成絮状冰晶，其制冰速度快且系统蒸发温度相对较高，理论上对提升制冷效率具有积极作用。

但该技术存在显著短板：一是控制难度大，相关研究表明，动态系统需实时调节冰晶粒径，导致

控制算法复杂度呈指数级提升,不仅加剧系统运行不稳定性,易引发控制偏差与故障,还显著增加维护成本与技术门槛;二是管路压损高,清华大学2021年实验显示,当冰晶体积分数超过20%时,管路压损增幅可达120%,严重降低冰浆输送效率,增加系统能耗;三是设备运维成本高,核心设备如冰浆泵需具备高扬程、大流量特性以克服冰晶流动阻力,普遍存在高能耗、高故障率问题。

2.2 静态蓄冰技术原理与技术优势

静态蓄冰技术采用与动态蓄冰截然不同的工作模式,制冰过程于冷却管外或专用容器内完成,冰体始终处于相对静止状态,无需复杂的冰晶流动控制调节装置,系统结构更简洁,维护难度大幅降低。

近年来,静态蓄冰技术在材料与结构优化领域成效显著,进一步强化了技术优势。某团队2023年研发的石墨烯增强相变材料,导热系数达 $8.7\text{W/m}\cdot\text{K}$,将其应用于蓄冰槽,可有效提升制冰速率与储冰效率,延长冰体融化周期。同时,静态蓄冰系统可利用电网谷荷电力制冰,实现“移峰填谷”,既平衡电网负荷,又能降低运行费用,在能效与经济性平衡上具备天然优势。

2.3 动态改静态的技术核心逻辑

动态与静态蓄冰技术的核心原理差异,决定了改造需攻克三大核心问题:一是设备兼容性问题,需拆除原有冰浆生成、输送设备,更换适配静态系统的双工况制冷主机、专用蓄冰槽等设备;二是系统控制逻辑重构问题,需从原有的冰晶粒径与流动控制,转变为基于负荷预测的制冰、释冷智能调控;三是空间适配问题,需针对静态蓄冰槽体积较大的特点,优化机房空间布局,保障系统稳定运行。

3 深圳财富港写字楼改造工程实践

3.1 项目概况与改造目标

深圳财富港写字楼坐落于深圳市宝安区西乡街道,2009年竣工投用,中央空调系统同步启用。2016年该建筑完成动态冰蓄冷系统改造,改造后制冷效果未达预期,且长期面临能耗高、维护成本高、运行不稳定等问题。

2023年,业主方及物业管理方决定重启改造,核心目标为全面升级为静态蓄冰系统,实现制冷效率提升、能耗降低、运维简化的多重目标,同时为写字

楼用户营造更舒适稳定的办公环境。

3.2 改造可行性分析

3.2.1 技术难点拆解

一是设备替换与兼容难题,原有动态系统的冰浆泵、冰晶输送管道等设备需全部拆除,新设备如双工况制冷主机、模块化蓄冰槽的选型需综合考量机房空间、电力供应及与原有系统的适配性;二是空间约束难题,静态蓄冰槽体积较大,而原有机房空间有限,设备布局易出现碰撞问题;三是能效与经济性平衡难题,静态系统初期投资较高,需通过科学设计实现全生命周期成本最优。

3.2.2 空间与技术可行性验证

为解决空间约束问题,项目引入建筑信息模型(BIM)技术开展三维布局优化。通过对机房内所有设备精准建模,初始阶段检测出37处设备碰撞点,经反复调整优化,最终将碰撞点降至9处,设备间距达标率达92%。同时,优化原蓄冰槽内部结构,采用模块化不锈钢蓄冰槽组合布置,适配场地条件,保障了静态蓄冰系统的安装可行性。

采用生命周期成本(LCC)分析方法评估经济性可行性,统筹初期投资、运行能耗、维护及设备更换等成本因素,验证了改造方案在全生命周期内可实现能效与经济性的最优平衡。

3.3 静态蓄冰系统优化设计

3.3.1 设备房升级与管网优化

设备房改造核心为制冷主机升级,将原有约克单工况制冷主机更换为双工况主机,实现夜间谷电时段制冰、日间峰电时段释冷的工况切换,且2016年的主机初步升级为本次改造奠定了基础。

借助AspenPlus流程模拟软件,确定主机最佳运行参数:制冰工况蒸发温度 -5.2°C ,保障低能耗快速制冰;制冷工况蒸发温度 3.6°C ,兼顾制冷需求与效率。经参数优化,系统COP较改造前提升19.3%。

管网优化环节,构建水力计算模型,通过调整管道布局、减少冗余弯道、更换老化管道,将管网扬程从45m降至28m,管网能耗较改造前减少38%,大幅降低循环水泵运行能耗(见图1)。



图1 管网优化

3.3.2 设备房升级与管网优化

为实现精准负荷预测与运行调控,项目搭建了基于长短期记忆网络(LSTM)的智能控制系统。模型选取室外温湿度、人员密度、室内设备功率、建筑围护结构性能等24项核心参数,经历史数据训练,预测误差均方根(RMSE)仅8.7%,精度显著优于传统模型。

结合动态优先级调度算法,系统可依据实时负荷、电价及设备状态,动态调整设备启停优先级,谷电时段优先启动主机机制冰储冷,将谷电利用率从改造前的21%提升至89%,既降低电费支出,又助力电网“移峰填谷”(见图2)。



图2 智能控制系统

3.4 工程实施关键技术

项目采用模块化安装技术,创新设计可拆卸式设备基座,其安装精度达 $\pm 0.5\text{mm}$,可确保设备处于最优运行位置,且减震效率达72%,有效削弱设备振动对周边结构的影响。

各设备模块在工厂完成预制与调试后运输至现场组装,相较于传统安装模式,安装周期缩短30%,不仅提升施工效率、降低成本,还便于后期维护更换,可大幅减少设备故障停机时间(见图3)。

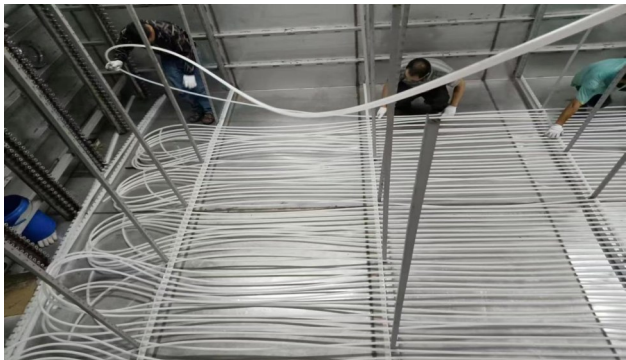


图3 模块化安装

3.5 改造综合效益评估

3.5.1 经济效益

项目总投资280万元,涵盖设备购置、安装调试及技术研发等成本。改造完成后,写字楼年节约电费达60万元,经测算,项目成本效益比(BCR)达2.37,即每投入1元,全生命周期可获得2.37元收益,经济回报率较高。

3.5.2 技术与创新效益

项目创新性提出受限空间动态重构技术,通过设备布局优化、管道规整及模块化安装,设备布置密度较传统方案提升31%,破解了机房空间受限的行业共性难题。同时,构建LSTM-BP双模预测算法,融合LSTM时间序列处理优势与BP神经网络函数逼近能力,负荷匹配精度达93.6%,为静态蓄冰系统智能控制提供了技术支撑。

4 结论与展望

本文通过系统对比动态与静态蓄冰技术体系,明确了动态改静态的核心技术逻辑,再结合深圳财富港写字楼的工程实践,验证了改造方案的可行性与有效性。改造后系统不仅实现19.3%的COP提升与年60万元的电费节约,还形成了受限空间布局优化、智能负荷预测等可复制的技术与方法,为既有建筑冰蓄冷系统改造提供了完整范式。

当前,粤港澳大湾区1200万 m^2 商业建筑的中央空调系统普遍存在能耗高、效率低问题,本研究的技术路径可为此类建筑改造提供有力支撑。

未来,可进一步探索静态蓄冰系统与光伏、储能系统的集成应用,推动建筑能源系统深度脱碳;同时持续优化静态蓄冰技术的材料性能与系统成本,提升运行可靠性。