

夜间蓄冷蓄热技术在商场空调系统中的应用与经济效益分析

吴树军

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 商场建筑营业时段集中、客流波动明显, 空调冷负荷和热负荷具有较强峰谷差。夜间蓄冷蓄热技术能够利用低谷电价完成冷量或热量储存, 在白天高峰时段释放, 从而降低运行费用和最大需量。文章结合典型大型商场空调系统, 比较水蓄冷、冰蓄冷和水蓄热的适用条件, 构建分时电价下的经济性测算方法, 并从负荷预测、蓄能量控制、主机台数联动和数据化运维角度提出运行策略。测算结果表明, 在具备蓄能空间和峰谷价差的条件下, 水蓄冷蓄热一体化方案可取得较好经济收益, 并兼具削峰填谷和提升冷站运行稳定性的价值。

关键词: 商场空调; 夜间蓄冷; 蓄热; 分时电价; 经济效益

Analysis of the Application and Economic Benefits of Nighttime Cooling and Heating Storage Technology in Shopping Mall Air Conditioning Systems

Wu Shujun

China Metallurgical Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., China Beijing 100176

Abstract: Shopping malls have concentrated operating hours and noticeable fluctuations in customer flow, resulting in significant peak-to-valley differences in cooling and heating loads of air conditioning systems. Nighttime cooling and heating storage technology can store cooling or heating during off-peak electricity periods and release it during daytime peak hours, thereby reducing operating costs and peak demand. This paper examines typical large shopping mall air conditioning systems, comparing the suitability of water cooling storage, ice storage cooling, and water heating storage, establishes an economic assessment method under time-of-use electricity pricing, and proposes operational strategies from the perspectives of load forecasting, energy storage control, coordination of main units, and digital operation and maintenance. Calculation results show that under conditions with storage space and peak-to-valley price differences, an integrated water-based cooling and heating storage solution can achieve good economic benefits, while also helping to flatten peaks and valleys and improve the stability of the chiller station operations.

Keywords: Shopping mall air conditioning; Nighttime cooling storage; Heating storage; Time-of-use electricity pricing; Economic benefits

0 引言

商场建筑空调负荷具有营业时段集中、客流波动大、内区发热量高和冷源运行时间长等特点。白天客流和照明负荷叠加时, 冷水机组、电梯、照明和餐饮排风共同推高需量; 夜间闭店后, 建筑仍有围护结构蓄热、设备散热和次日预冷需求, 但负荷明显低于白天。夜间蓄冷蓄热技术正是利用这种时段差, 把低谷电力转化为可储存的冷量或热量, 在营业高峰释放, 降低高价电时段冷机运行功率。民用建筑暖通设计规范对室内热舒适、通风和空调系统形式提出基础要求, 蓄能系统的应用也应以满足这些使用功

能为前提^[1]。

国家层面近年来强调空调负荷参与削峰填谷。有关部门在迎峰度夏报道中指出, 冰蓄冷和水蓄冷能够把部分高峰制冷负荷转移至低谷时段, 对降低用户成本和缓解电网压力均有作用^[2]。不过, 工程实践不能把“峰谷价差大”直接等同于“项目一定划算”。蓄冷蓄热系统是否经济, 取决于商场营业时间、当地分时电价、蓄能容量、机组低温工况效率、蓄能损失、控制策略和维护成本。本文以典型大型商场空调系统为对象, 分析夜间蓄冷蓄热技术的适用路径、运行策略和经济效益。



图1 商场夜间蓄冷蓄热运行逻辑

资料来源：作者根据蓄能空调运行规律及公开文献控制策略整理

1 商场负荷特征与蓄能适配性

商场空调负荷最突出的表现是日内峰值集中。通常 10:00 开店后人员密度持续上升，餐饮区、影院和儿童业态在中午及晚间形成局部峰值，冷负荷在 13:00 ~ 17:00 达到高位。负荷预测也比普通办公楼更难，促销活动、节假日客流、外摆活动和门厅渗透风都会改变当日需求。与此同时，室内舒适边界不能随意放宽。关于中国寒冷地区购物中心热环境的实测研究显示，商场夏季存在过冷现象，合理设定室内温度既能维持可接受度，也能减少不必要冷量^[3]。因此，蓄能系统的经济性不仅来自电价套利，也来自更稳的负荷管理和更合理的温度设定。

蓄冷方案主要分为水蓄冷和冰蓄冷。水蓄冷系统温度工况接近常规冷水机组，制冷效率较高，设备和控制相对简单，缺点是蓄能密度低，需要较大水池或蓄能罐；冰蓄冷系统单位体积蓄冷量高，占地较小，适合商业综合体地下空间紧张场景，但制冰工况蒸发温度低，夜间制冷能耗会增加。蓄热可采用蓄热水箱、电锅炉加蓄热、热泵加蓄热等形式，北方商场冬季可利用谷电制热并在白天释放，南方商场则更多关注生活热水、再热和过渡季短时供热。

表1 商场蓄能技术适配性比较

方案	适用条件	优势	限制因素
水蓄冷	有消防水池、地下水池或可布置蓄能罐	机组效率较高、系统简单、维护方便	占地大、保温和布水要求高
冰蓄冷	地下空间紧张且峰谷价差明显	蓄能密度高、削峰能力强	制冰效率下降、初投资较高
水蓄热	冬季白天热负荷集中、谷电政策明确	控制简单、可与热泵或电锅炉配合	保温损失与水箱体积需核算
冷热一体蓄能	全年冷热需求均存在、物业运维能力较强	设备利用率高、削峰周期更长	控制策略复杂、调试要求高

2 系统构成与运行模式

典型商场蓄冷系统由冷水机组、蓄能装置、板式换热器、一次泵、二次泵、释冷泵、冷却塔和自控系统组成。水蓄冷常采用自然分层水池，布水器的均匀性决定斜温层厚度；冰蓄冷可采用盘管式、封装式或冰球式装置，需处理乙二醇溶液、防冻保护和换热温差。购物中心冷水系统的热经济与环境研究提示，冷站评价不能只看主机耗电，还要把泵、换热器、冷量成本和碳排放纳入同一成本口径^[4]。

运行模式可分为全蓄、分量蓄冷和削峰蓄冷。全蓄模式夜间完成次日大部分冷量储存，白天主要释冷，适合营业时间较短、峰谷价差很大的项目，但蓄能容量和初投资较高。分量蓄冷模式夜间储存一部分冷量，白天蓄能装置和冷水机组联合供冷，是商场较常见的方案。削峰蓄冷模式只在尖峰电价或需量高点释放冷量，蓄能容量较小，经济性更依赖需求电费和高峰电价。冬季蓄热也可采用相同思路：谷段蓄热，平段或峰段释热，并保留常规热源作为极端天气备用。

为保证数据来源可追溯，本文不再设定某匿名商场的建筑面积、峰值冷负荷和投资额，而是采用公开文献中的运行指标作为参照，重点讨论商场空调系统应用夜间蓄冷蓄热时应如何建模、如何控制和如何核算经济性。华东某机场水蓄冷系统优化控制实践表明，基于负荷预测和峰谷电价的控制策略可提高蓄冷效率和蓄冷利用率，并带来可观电费收益^[5]。机场和商场负荷形态不同，但其“预测负荷—确定蓄能量—控制斜温层—优化释冷时段”的方法，对大型商业建筑具有参考价值。

表2 典型日运行策略

时段	电价属性	夏季运行	冬季运行
00:00 ~ 08:00	谷段	冷机高效蓄冷，末端低速预冷按需开启	热泵或电锅炉蓄热，保证水箱上限温度
08:00 ~ 10:00	平段	少量释冷配合开店预冷	释热预热公共区和门厅
10:00 ~ 17:00	峰/平段	蓄冷与冷机联合供冷，控制需量	按负荷释热，常规热源补峰
17:00 ~ 22:00	峰段	优先释冷，减少冷机台数	释热维持舒适，关闭低客流区域末端
22:00 ~ 24:00	平段	水池回收与次日负荷预测修正	低负荷保温运行，准备谷段蓄热

3 经济效益测算方法

蓄能系统经济性可用年费用法评价。年费用包括设备折旧、维护费、夜间蓄能电费、白天补冷补热电费、泵和冷却塔电费、蓄能损失折算电费以及需量电费。收益包括高峰电量转移节约、需量下降收益、常规主机装机容量减少收益和可能的需求响应补贴。冰蓄冷建筑应用经济性研究表明，建筑类型和储能策略会明显影响回收期，商业建筑通常比全天负荷连续的住宅更容易获得经济收益^[6]。

本文采用以下简化公式表达蓄能经济性。对于水蓄冷或水蓄热，蓄能量可按水量、温差和水的比热容估算；年净收益则由峰谷电价转移收益、需量收益、投资年化收益、附加电耗、蓄能损失和运维费用共同决定。对于冰蓄冷，需把制冰工况 COP 下降单独计入。光伏与冰蓄冷联合优化研究显示，在分时电价下进行能量管理可进一步降低运

行成本^[7]，但若商场屋面可利用面积有限，光伏收益不宜在基础测算中夸大。

$$Q_s = \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \Delta T / 3600$$

式中， Q_s 为水蓄能量， ρ 为水密度， c_p 为定压比热容， V 为有效蓄水体体积， ΔT 为可利用温差。

$$B = F_{peak} + F_{demand} + F_{invest} - C_{night} - C_{loss} - C_{om}$$

式中， B 为年净收益； F 为收益项， C 为成本项。该式用于建立经济性核算框架，实际数值需来自项目电价单、负荷曲线和设备报价。

实际测算时，应收集当地分时电价单、最近一年逐时或十五分钟负荷曲线、冷站分项电耗、冷量计数据、蓄能装置报价、施工安装费用和运维费用。电价、设备投资和可转移负荷都具有明显地域差异，不宜在论文中给出无来源的统一取值。表 3 和图 2 采用公开文献数据说明蓄能系统可能达到的指标量级，项目落地时仍应按本项目真实资料重新计算。

若后续补充商场项目资料，建议优先采用电费账单、需量记录、冷量计和蓄能水池温度曲线作为证据链。公开文献数据适合说明技术可行性和指标区间，项目自身数据则用于证明经济性，二者在论文中应分开呈现。

表3 公开文献中蓄能与需求响应运行指标

文献	对象	公开指标	本文采用方式
张昆等 (2023)	华东某机场水蓄冷	斜温层相对厚度降低 31.7%，蓄冷效率提升 12.8%，蓄冷利用率提升 24.0%，制冷季节约电费约 184.6 万元	支撑负荷预测和斜温层控制
Sun 等 (2024)	不同建筑冰蓄冷经济性	合适策略下年费用最高可降低约 50%	支撑商场适用性与策略敏感性
Odufuwa 等 (2024)	PV + 冰蓄冷 HVAC	夏季运行费用节约约 33%	支撑分时电价下能量管理
Tang 等 (2023)	区域供冷冰蓄冷 MPC	两个月运行费用降低约 8%	支撑预测优化控制

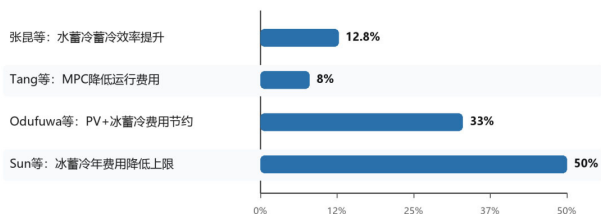


图2 公开文献中蓄冷与优化控制经济运行指标

数据来源：张昆等（2023）、Sun等（2024）、Odufuwa等（2024）、Tang等（2023）

4 控制策略与智慧化改进

蓄能系统最容易出现的问题是“夜间蓄得多，白天用

不完”或“白天用得早，尖峰时没有余量”。解决这一问题不能依赖人工经验，而要建立日负荷预测和滚动修正。商场可利用历史客流、天气预报、节假日标签、租户营业状态和前一天实际冷量建立预测模型，早晨根据实测回水温度和客流修正当日释冷计划。大型商业建筑中央空调参与需求响应的经济调度研究已经把舒适约束、热惯性和负荷不确定性纳入优化框架^[8]，这与智慧科技期刊关注的智能控制、数据分析方向较为契合。

具体控制上，蓄冷水池应监测上、中、下多点温度，计算斜温层位置和可用蓄冷量。释冷泵不宜固定频率运行，而应根据二次侧供水温度和板换端差调节。冷水机组台数应与蓄能状态联动：当预测剩余营业时段冷量不足时，提前开启一台主机平稳补冷；当蓄能量充足且峰段需量接近上限时，限制主机加载，优先释冷。冬季蓄热则要控制水箱上限温度，避免为追求更多蓄热量而导致热泵效率下降或电锅炉运行时间过长。

数据管理也会影响经济性。商场中央空调能耗预测研究指出，时间、天气和设备运行状态等因素能够较好解释大型商场空调能耗变化^[9]。在实际项目中，应把冷量计、电表、水池温度、主机 COP、泵频率、室内温湿度和客流数据接入同一平台，形成日清单。物业每周复盘三类指标：蓄能利用率、峰段需量削减率、舒适投诉率。只有这三类指标同时达标，才能说明蓄能系统不是把能耗从白天搬到夜间，而是实现了费用和负荷的协同优化。

5 风险与工程对策

蓄能项目的主要风险来自容量配置、空间条件和运行维护。容量过小，无法覆盖峰段；容量过大，初投资和蓄能损失上升。建议方案阶段先用逐时负荷曲线确定“经济蓄能量”，再校核极端天气下的备用能力，而不是直接按设计日峰值负荷配置。对既有商场改造，应重点核查地下空间、防水、结构荷载和消防水池功能边界，不能因蓄冷改造影响消防安全。水池保温、防结露和检修通道也要在土建阶段处理，否则后期维护成本会超过预期。

另一个风险是控制策略过于复杂，物业难以掌握。智慧化并不等于把所有参数都交给算法，现场仍要保留清晰的手动模式和故障降级逻辑。建议设置三种运行模式：经济优先、舒适优先和应急保供。经济优先用于普通工作日，舒适优先用于大型促销和高客流日，应急保供用于水池温度异常、板换故障或电价策略临时变化。基于模型预测控制的冰蓄冷区域供冷运行研究表明，把负荷预测、物理模型和优化算法结合起来，可以在分时电价下进一步压低运

行费用^[10]，但工程落地时应把算法输出转化为物业能理解的启停、温度和流量指令。

6 敏感性分析与实施建议

经济性对峰谷价差最敏感。峰谷价差收窄时，蓄冷电量转移收益会明显下降；若当地同时执行需量电费，且蓄能系统能够稳定削减最大需量，则收益会更稳定。因此，项目立项前应取得最近一年的电费清单，拆分电度电费、基本电费、力调电费和附加费用，不能只用公开目录电价估算。部分商场采用商业租户分摊电费，若冷站电费由物业承担而舒适收益由租户感知，还需要提前设计节能收益分配机制。

容量配置对回收期也有明显影响。蓄能容量过小，尖峰时段仍需多台冷机运行，需量收益有限；容量过大，水池、换热器和泵组投资增加，夜间蓄能用不完还会造成热损失。比较稳妥的做法是先用典型工作日、周末和节假日三类负荷曲线分别计算，再按 80%~90% 保证率确定经济容量。对于全年促销活动多、客流不确定性高的商场，可把蓄能容量分为基础容量和弹性容量两部分，基础容量服务普通日，弹性容量通过提前蓄能或常规主机补充应对高峰活动。

蓄热经济性不应简单套用蓄冷逻辑。冬季热负荷受门厅渗透风和室外温度影响更大，北方商场还可能存在供暖系统与空调热水系统并行的情况。如果已有市政热力，谷电蓄热不一定比集中供热便宜；如果采用空气源热泵，低温夜间制热效率下降也会抵消部分谷电优势。方案比选时要分别计算电锅炉蓄热、热泵蓄热、市政热力和燃气锅炉的单位热量成本，并把设备面积和安全管理纳入决策。

实施阶段建议把蓄能系统纳入商场改造节奏，而不是独立施工。商场通常难以长时间停业，冷站改造应安排在过渡季或夜间分区实施。水池改造涉及防水、保温、结构荷载和检修口，板式换热器和蓄能泵组涉及机房管路切换，任何一个环节拖延都可能影响开业。为降低风险，可先建设旁通管和临时供冷方案，再分阶段接入蓄能水池。调试期间要保留常规冷源直接供冷能力，待蓄能运行稳定后再逐步启用经济模式。

运维人员培训应早于系统交付。蓄能系统的运行界面不能只显示复杂曲线，还要把关键判断转化为清晰状态，例如“可用蓄冷量充足”“预计尖峰不足”“建议提前补冷”“板换端差偏大需检查”等。这样物业班组才能在高峰日快速判断是否需要调整。对于大型商场集团，多个项目可采用统一的数据口径，把单位面积冷耗、单位客流冷耗、

蓄能利用率和峰段削减率纳入月度排名，形成可复制的运行经验。

从环境效益看，蓄冷蓄热主要降低的是高峰用电需求和运行费用，本身未必降低全日总电耗，尤其冰蓄冷可能因低温制冰导致电耗增加。因此，论文和项目汇报中应谨慎表述为“削峰、降费、优化负荷曲线”，只有在系统效率提升或可再生能源消纳增加时，才适合进一步说明节能减碳。若需要核算碳减排，应采用当地电网分时排放因子或经认可的年度平均因子，并说明计算边界。

商场业态调整也会改变蓄能收益。餐饮面积增加会提高新风和排风负荷，影院或培训业态增加会拉长夜间使用时间，超市和生鲜业态则可能带来独立冷链负荷。若商场后续招商变化较大，蓄能系统不宜按一次负荷计算结果长期固定运行，而应每年制冷季前重新校核典型日负荷曲线。通过调整夜间蓄能量、白天释能比例和主机启停阈值，可以让系统适应业态变化，而不是在几年后变成高投资低利用率设备。

经济效益评价还应考虑资金时间价值。除简单静态回收期外，建议补充净现值、内部收益率和敏感性分析。业主决策时可设置三种情景：保守情景按低客流和低价差计算，基准情景采用最近一年平均客流和现行电价，乐观情景计入需求响应补贴或光伏消纳收益。三种情景都能覆盖投资成本时，项目抗风险能力才比较充分。

投稿写作中需要避免把蓄冷蓄热写成万能节能技术。更合理的表述是：它通过时间转移改善电费结构和电网负荷，通过稳定供冷供热提升冷站运行组织，通过数据化控制减少经验运行偏差。若当地没有明显峰谷价差、商场全天负荷连续、地下空间紧张或物业运维能力不足，蓄能项目可能并不适合。把适用边界讲清楚，反而能提高论文的工程可信度。

验收阶段应把经济性指标和运行指标同时纳入。经济性指标包括峰段电量减少量、最大需量下降值、蓄能电费节约和运维费用变化；运行指标包括蓄能利用率、水池分层稳定性、板式换热器端差、主机启停次数和室内温湿度达标率。若只看电费，可能忽略水池分层破坏和设备频繁启停；若只看舒适，可能掩盖蓄能利用不足。双指标验收能帮助业主判断系统是否真正进入经济运行状态。

可复制推广时，商场集团可以先选择一座电价差明显、冷站资料完整、物业配合度高的门店作为样板，完成一个完整冷季和热季的运行验证，再把负荷预测模型、运行报表和故障处理流程复制到其他门店。不同城市电价政

策、气候和客流差异较大,设备方案可以不同,但数据口径应统一。这样既能减少重复试错,也能让后续项目的投资测算更有依据。

正式投稿前,若能补充连续十五分钟间隔的冷站电耗、冷量和水池温度数据,论文质量会进一步提高。数据曲线可以展示夜间蓄能、白天释能和尖峰削减的过程,比单纯列出年费用更有说服力,也更符合智慧化运行分析的写法,便于后续复核和现场追踪,减少经验判断误差。

7 结语

夜间蓄冷蓄热技术适合负荷峰谷差明显、营业时间集中、分时电价差较大的商场建筑。水蓄冷蓄热方案设备相对简单,适合有水池或地下空间的项目;冰蓄冷更适合空间紧张且削峰需求强的项目,但必须计入制冰效率下降和维护成本。经济性测算不能只比较峰谷电价,还应纳入需量收益、附加电耗、蓄能损失、运维费用和舒适约束。

从公开文献看,商场或大型公共建筑采用蓄冷技术后,经济收益并不只来自峰谷电价差,还与蓄能利用率、负荷预测精度、需量控制和控制策略有关。后续应用中,应以逐时负荷预测为基础,建立蓄能量、主机台数、泵频和室内舒适度之间的联动控制,并通过周度复盘保证蓄能利用率。这样才能把蓄冷蓄热从单纯设备改造,转化为商场空调系统的长期运行能力。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50736-2012 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[2] 国家发展和改革委员会. 错峰蓄冷助力迎峰度夏期间电力平衡[EB/OL]. 2021-08-13.

[3] Zhao S, Yang L, Gao S, Meng L, Yan H, Zhai Y. Field investigation on the thermal environment and thermal

comfort in shopping malls in the cold zone of China[J]. Building and Environment, 2022, 214: 108892.

[4] Portela Abreu R, Lobo Correia V H, Barbosa Lourenço A, da Silva Marques A, Carvalho M. Thermoeconomic and thermoenviromental analysis of the chilled water system in a shopping mall[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 134: 304-311.

[5] 张昆, 廖滢, 孟令然等. 华东某机场水蓄冷系统优化控制策略研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(S1): 183-186.

[6] Sun C, Diao Y, Fang D, Li Y. On the role of building use and operational strategy in integrating ice storage systems: an economic perspective[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113025.

[7] Odufuwa O Y, Kusakana K, Numbi B P, Tartibu L K. Optimal energy management of grid-connected PV for HVAC cooling with ice thermal storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109844.

[8] Qi T, Hui H, Song Y. Chance constrained economic dispatch of central air conditionings in large-scale commercial buildings considering demand response[J]. Energy and Buildings, 2024, 320: 114607.

[9] Bao P, Zou H M, Bai P F, Feng Y Y. Building energy consumption prediction and energy control of large-scale shopping malls based on a noncentralized self-adaptive energy management control system[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2021, 39(5): 1381-1393.

[10] Tang H, Yu J, Geng Y, Liu X, Lin B. Optimization of operational strategy for ice thermal energy storage in a district cooling system based on model predictive control[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62: 106872.