

相变蓄冷技术在数据中心的应用现状及展望

刘云花¹, 袁浩², 陈飞虎^{3*}, 杨志新⁴, 刘丽辉⁴

¹ 红河职业技术学院 云南蒙自

² 长沙中昊信息技术有限公司 湖南长沙

³ 井冈山大学机电工程学院 江西吉安

⁴ 长沙麦融高科股份有限公司 湖南长沙

【摘要】电费是数据中心运营的最大成本支出，占总运行成本的 60%以上。相变储能技术因其高储能密度、小型化优势，成为数据中心节能的重要方向。本文综述了相变蓄冷、与热管耦合等技术在数据中心的应用现状：通过引入相变材料构建蓄冷系统，可实现负荷峰值削减、错峰调节及应急制冷。实际案例显示，相变储能式空气处理机组可将数据中心能源使用效率 PUE 从 2.1 降至 1.51，全年平均节能率达 50%，自然冷却时间占比提升至 25%；60kW 相变储能机组通过蓄冷-释冷循环，可减少空调开启时间 50%以上，应急状态下保障 15 分钟过渡制冷。研究表明，相变材料与热管耦合技术能有效解决热负荷时空分布不均问题，降低制冷剂充注量 30%，并通过分温区管理实现系统稳定运行。未来，随着相变材料成本下降及模块化设计普及，该技术有望在大型数据中心实现规模化应用。

【关键词】数据中心；相变储能技术；最大设计负荷；经济性；耦合

【收稿日期】2025 年 11 月 14 日

【出刊日期】2025 年 12 月 25 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250392

Application status and prospect of phase change technology in data center

Yunhua Liu¹, Hao Yuan², Feihu Chen^{3*}, Zhixin Yang⁴, Lihui Liu⁴

¹Honghe Vocational and Technical College, Mengzi, Yunnan

²Changsha Zhonghao Information Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan

³School of Mechanical and Electrical Engineering, Jinggangshan University, Ji'an, Jiangxi

⁴Changsha Maxxom High-Tech Company Ltd., Changsha, Hunan

【Abstract】 Electricity cost constitutes the largest operational expenditure for data centers, accounting for over 60% of total operating costs. Phase change energy storage (PCES) technology has emerged as a critical direction for data center energy efficiency, owing to its advantages of high energy storage density and miniaturization. This study reviews the application status of PCES technologies in data centers, including cold storage systems and heat pipe coupling integration. By incorporating phase change materials (PCMs) into cold storage systems, peak load reduction, load shifting, and emergency cooling can be achieved. Practical case studies demonstrate that PCES-based air handling units reduce the Power Usage Effectiveness (PUE) from 2.1 to 1.51, achieving an annual average energy savings rate of 50% and increasing natural cooling utilization to 25%. A 60 kW PCES unit, through cool storage and release cycles, reduces air conditioning operation time by over 50% and provides 15 minutes of transitional emergency cooling. Research indicates that PCM-heat pipe coupling technology effectively mitigates spatiotemporal unevenness in thermal loads, reduces refrigerant charge by 30%, and ensures stable system operation via temperature zoning management. Looking ahead, with the decreasing cost of phase change materials and the widespread adoption of modular design, this technology is expected to achieve large-scale application in large data centers.

【Keywords】 Data center; Phase change energy storage technology; Maximum design load; Economy; Coupling

第一作者简介：刘云花（1987-）女，云南普洱人，研究生，讲师，研究方向：土木工程；

*通讯作者：陈飞虎（1982-）男，博士研究生，工学博士，高级工程师，博士后。

引言

相变蓄能技术被广泛应用于围护结构的节能等研究^[1]。当前的大型数据中心通常会配套大型水箱的储能系统, 利用波谷电价实现电费降低^[2]。但是利用水的显热变化进行储能, 储能密度很低, 而且水箱通常需要重达几千吨, 建设和维护成本很高, 水资源耗费大。基于此, 云南电网有限责任公司利用相变储能材料建设更为高效和低成本的储能系统。实现了储能系统的小型化, 达成了节约运行成本的目标。但是也存在着成本较高的不利, 主要原因是当前相变材料价格较为高昂。随着生产工艺的成熟和应用的广泛, 相变材料的成本将大幅下降, 相变储能系统的应用也将日趋广泛^[3]。目前互联网及大数据产业的飞速发展, 作为重要支撑的数据中心发展迅速^[4]。而热管空调因其节能特性被广泛应用于数据中心的冷却^[5]。热管主要的应用为相变技术。为了指出数据中心节能技术的方向, 本文介绍了相变蓄能技术的研究现状, 并为数据中心相变蓄能技术相关产品的开发等提供参考。

1 相变蓄冷技术的应用

沈阳建筑大学以固化十二醇硬脂酸为蓄冷材料增设蓄冷系统。结果显示, 改造后能源使用效率 PUE 从 2.1 降低为 1.51。自然冷却全年使用时间占 25%, 年节能率达 28%^[6]。云南电网有限责任公司利用相变储能材料建设更为高效和低成本的储能系统降低数据中心的

运行费用^[7]。西安科技大学提出了利用相变材料储能特性解决大型数据中心高功率发热密度机房停电情况时的应急制冷方案^[8]。麦融高科开发的 60kW 相变储能机组, 储能容量 200kJ, 释冷功率 60kW, 结合自然冷源利用, 全年空调开启时间减少 52%, 年节电 12 万度, 投资回收期约 3 年。该机组通过在电价低谷时段 (00:00-08:00) 蓄冷, 高峰时段 (10:00-18:00) 释冷, 降低电费支出 40%, 系统故障时可维持机房温度 ≤ 28℃ 达 15 分钟, 为检修争取时间。相变储能式空气处理机组在室外温度、湿度达到设置要求时引入室外冷空气, 经过高效过滤后送入室内为机房降温的同时将部分冷量储存在相变储能材料中; 在室外温度升高不满足引入条件时通过释放所储存的冷量为机房降温以达到大幅减少空调开启时间节省电能的目的。该技术的关键点在于利用新型储能材料结合环境要求解决了自然冷源供求在时间和空间上不匹配的矛盾, 大幅提高了自然资源的利用效率。综合全年平均节能率达到 50%。香江科技公司通过增加相变蓄冷模块的热管系统, 包括相变模块, 相变模块设置于底板下送风的风道内, 相变模块内填充有相变材料。当热管正常工作时, 在内部增加的相变模块吸收蒸发器管道内制冷剂的冷量, 进行蓄冷。而当热管系统出现故障时, 相变模块的冷量释放到蒸发器。该实用新型能够有效地解决系统应急蓄冷的问题, 如图 1。

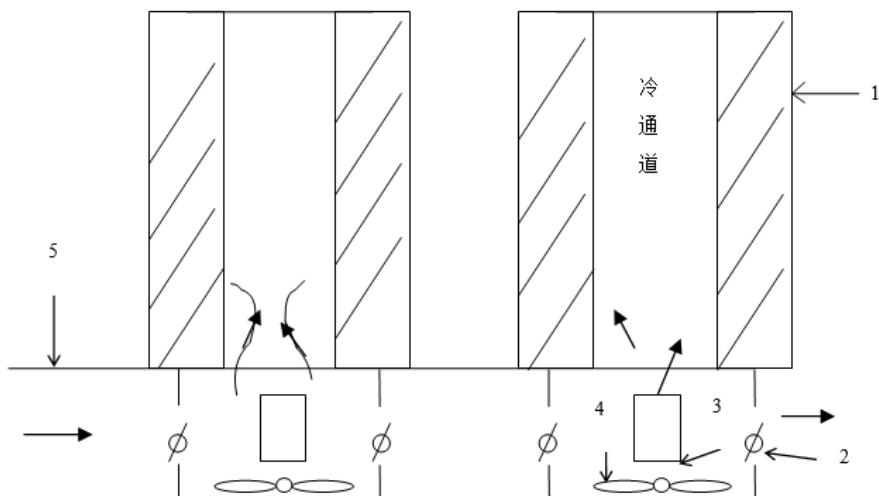


图 1 增加相变蓄冷模块的热管系统

2 热管与相变耦合产品

2.1 温度分区管理方式

热管被广泛应用于数据中心、超算中心等的冷却,

而系统的充液率是影响系统稳定运行的重要因素之一。当充注量过多时, 会出现拥塞现象, 导致换热系数显著降低; 当充注量过少时, 则会出现干烧现象。同时, 由

于多联热管应用场景差异极大, 其结构形式、管道长度等参数各不相同, 难以设置统一充注量, 且现场缺乏反复测试条件, 导致实际运行中难以实现最佳充注量, 影响温度调整效果。

为解决热管充注量难以精准控制、易出现拥塞或干烧的技术问题, 本实用新型提供一种内置相变模块的热管系统如图 2, 技术方案如下。

系统组成: 包括互相连接的冷凝器和蒸发器, 蒸发器由多段首尾相连的换热管组成, 管内充填制冷剂; 在换热管内增设相变模块, 模块内填充相变材料。

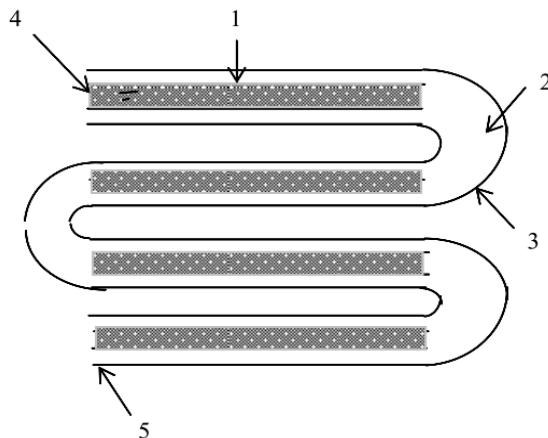
工作原理: 当服务器散热量增大、超过蒸发器内制冷剂吸热范围时, 相变模块吸收热量并熔化蓄热, 避免干烧; 当系统热负荷降低时, 相变模块凝固放热, 补充制冷剂热量不足, 防止拥塞。

技术优势: 通过固化相变模块的设置, 可减少制冷

剂充注量, 降低流动阻力, 从而减轻拥塞问题; 同时降低对充注量精度的要求, 扩大充注容错范围, 实现分温区管理, 保障系统在-20℃至 50℃环境下稳定运行。

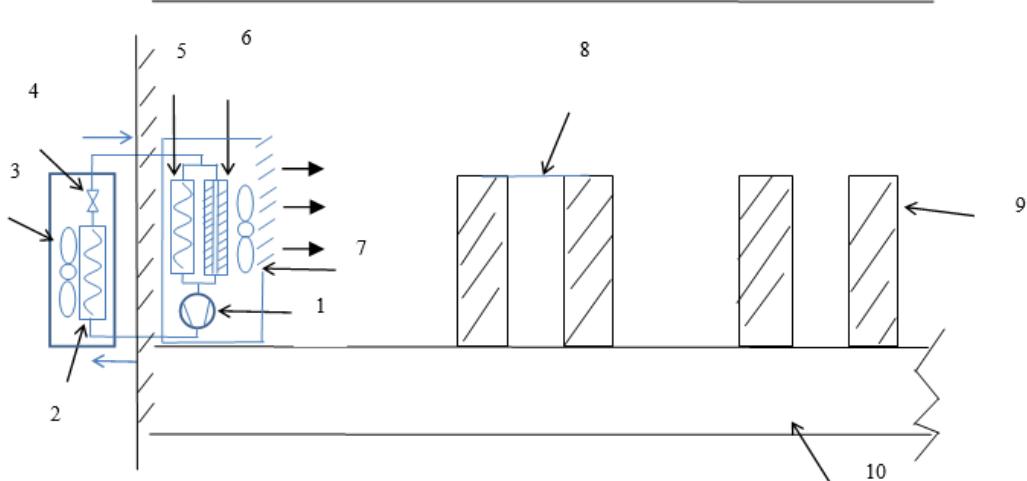
2.2 与蒸发器耦合

本技术为增加相变模块的数据中心机房空调, 包括相变模块, 相变模块设置于双蒸发器的一个蒸发器外侧, 相变模块内填充有相变材料, 如图 3。当送风机正常工作时, 相变模块吸收冷量, 进行蓄冷。当服务器负载增加时实现缓冲负荷压力; 在有峰谷电价差时进行移峰填谷; 而当空调系统需要检修或出现故障时, 相变模块的冷量释放并输送到服务器机柜。在空调正常运行时, 相变模块进行蓄冷。实现服务器负载增加时缓冲负荷压力; 有峰谷电价差时进行移峰填谷; 在停机检修或在空调出现故障时, 确保 15 分钟的过渡时间。



1. 内置相变模块; 2. 换热管; 3. 蒸发器; 4. 蒸发器入口; 5. 蒸发器出口

图 2 一种内置相变模块的热管系统示意图



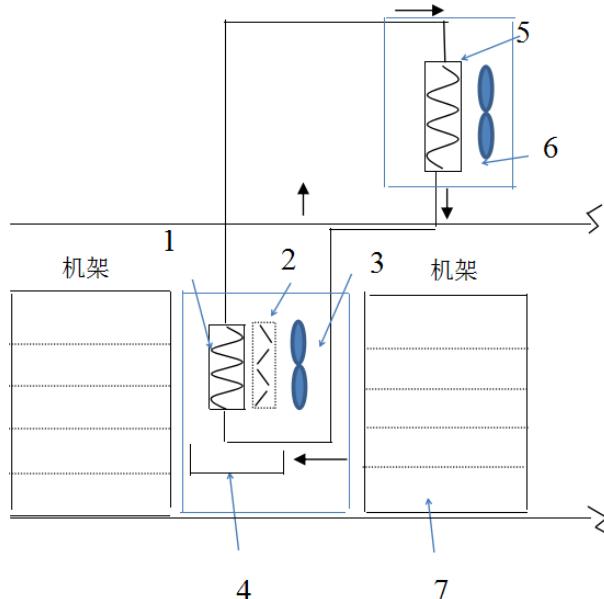
1. 压缩机; 2. 冷凝器; 3. 冷凝风机; 4. 膨胀阀; 5. 蒸发器 1#; 6. 蒸发器 2#; 7. 室内机; 8. 封闭冷通道; 9. 机柜; 10. 架空地板

图 3 增加相变模块的数据中心机房空调示意图

2.3 解决热负荷不均匀的问题

IT 服务器的负荷特点是相对稳定,但在时间和空间上不均匀。为了解决时间上负荷不均匀的问题,本课题组在列间热管的蒸发器前增设相变模块:一种数据中心用增设相变模块的列间热管空调,包括相变模块,相变模块设置于蒸发器的入口处,相变模块内填充有相变材料,如图 4。当蒸发风机正常工作时,相变模块吸收热量,进行蓄热。实现服务器负荷增加时缓

冲负荷压力;而当服务器负荷减小时,相变模块的热量释放至列间热管的蒸发器,并通过室外机进行散热。本实用新型能够有效地解决系统干烧的问题,减少制冷剂充注量,扩大制冷剂充注范围。降低风机的开启次数等。可保证空调系统的连续稳定运行,降低维护工作量。并可以在有峰谷电价差时进行移峰填谷。从而保证数据中心高效运行和节约系统运行费用和机房空间。



1.列间热管蒸发器; 2.相变模块; 3.蒸发风机; 4.冷凝水盘; 5.冷凝器; 6.冷凝风机; 7.服务器机柜

图 4 增设相变模块的列间热管示意图

3 模块化方案

上海贝尔股份有限公司介绍了阿尔卡特朗讯公司推出的模块化机房制冷方案的系统结构和制冷原理,通过与传统空调制冷方案的对比,得出结论,即利用制冷剂相变制冷的模块化机房制冷是解决高热密度数据中心机房制冷的有效方案^[9]。

4 热管相变混合工质创新技术

为满足高寒地区和机载设备中电子设备对散热装置较宽工作温度的要求,提出采用乙醇-水混合物作为环路热管的工质,开展了乙醇浓度对环路热管启动特性和热输运性能影响的研究。实验表明:基于乙醇-水混合工质的环路热管能在低功率下启动,随着工质中乙醇浓度的减小,最小启动功率,启动温度升高,启动性能变差;使用混合工质可以改善环路热管的热输运性能,降低系统热阻,提高最大热负荷^[10]。

通过采用非共沸工质将具有恒温特性的中间媒介

改为具有变温特性的媒介来实现减少换热温差损失和提高总换热效率,再通过系统中加入的循环泵,给整个热管系统提供了运行动力,解决了传统热管系统运行时两个热交换器的高低位置差以及输送距离问题,从而降低了设备的使用条件限制,且所用整个系统装置结构简单,环境友好。

5 应用前景

5.1 技术发展方向

(1) 材料优化

开发低成本复合相变材料,目标将材料成本从当前 80 元/kg 降至 2030 年 40 元/kg,同时提升导热系数至 $10\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上。

(2) 系统集成

与 CDU (冷水分配单元) 耦合,通过相变模块缓冷冷量波动,使系统 PUE 进一步降至 1.2 以下;推出 10kW、30kW、60kW 系列化机组,适配不同规模数据

中心, 进行模块化设计。

(3) 智能控制

结合 AI 算法预测热负荷变化, 动态调节相变材料蓄/释冷速率, 实现“按需储能”。

5.2 市场应用分析

(1) 政策驱动

中国“东数西算”工程要求数据中心 $PUE \leq 1.3$, 相变技术可帮助西部冷源丰富地区实现 $PUE \leq 1.1$, 获得政策补贴。

(2) 市场规模

据《中国数据中心储能白皮书》, 2025 年相变储能市场规模将达 50 亿元, 年复合增长率 35%, 其中数据中心占比超 60%。

(3) 竞争优势

相比传统水箱储能, 相变储能密度达 $200\text{-}300\text{kJ/kg}$, 可减少设备占地面积 70%, 尤其适合城市核心区数据中心改造。

6 结论与建议

相变技术在数据中心的应用的作用主要有:

(1) 在时间上进行调节, 达到降低产品设计负荷的目的

(2) 根据电价进行匹配, 达到节能的目的

主要的研究热点问题: 相变材料的性价比参数、相变区间的稳定性、相变速率的变化等。相变模块的放冷密度。相变技术在数据中心的应用还停留在小范围, 主要作为应急等方式。大规模应用的工作亟待开展。建议以后研究的方向如下:

- ①进行分温区管理, 降低系统成本等。
- ②模块化, 便于安装。
- ③建立相关的标准体系。
- ④对系统进行经济性评估。
- ⑤相变材料的性能衰减等评估。

参考文献

- [1] 刘丽辉, 莫雅菁, 孙小琴, 李杰. 板式相变储能单元的蓄热

特性及其优化 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(06): 1784-1789.

- [2] Xiaoqin Sun, Yajing Mo, Jie Li, Youhong Chu, Lihui Liu, Shuguang Liao. Study on the energy charging process of a plate-type latent heat thermal energy storage unit and optimization using Taguchi method. Applied Thermal Engineering, Volume 164, 2020.
- [3] 张媛琳, 谭宽. 相变储能系统在数据中心中的应用 [J]. 信息与电脑(理论版). 2019(22): 6-7.
- [4] 刘丽辉, 莫雅菁, 孙小琴, 李杰, 李传常, 谢宝珊. 纳米增强型复合相变材料的传热特性 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(04): 1105-1112.
- [5] 王子彪, 熊伟, 刘艺唯. 热管蓄冷空调系统在数据中心的节能应用方案研究 [J]. 制冷与空调. 2015 年 9 月第 5 期: 71-74.
- [6] Feihu Chen, Shuguang Liao. Intelligent computer software based analysis of the heat pipe air conditioning system for internet data centers [J]. International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technique. 2019, Volume 5, Issue 8: 9-19.
- [7] 蔡伟. 相变雾化冷却: 唱响数据中心“绿化”新旋律 [J]. 中国优秀数据中心. 2018 年 001 期: 38-39.
- [8] 林庚. 相变材料在通信领域的应用研究 [J]. 邮电设计技术. 2014 年 12 期: 1-4.
- [9] 任玉迎, 殷飞平, 赵超. 模块化机房制冷系统及应用 [J]. 电信技术. 2011 年 3 期: 69-71.
- [10] 张先锋, 汪双凤, 张伟保, 等. 基于混合工质小型环路热管的实验研究 [J]. 工程热物理学报. 2011 年第 12 期.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

