

# 长沙地区某联通机房热管空调改造的节能分析

齐蓉<sup>1</sup>, 陈飞虎<sup>2,3</sup>, 杨志新<sup>3</sup>, 邢利<sup>3</sup>, 廖曙光<sup>3</sup>

<sup>1</sup>湖南省产品质量检验研究院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙

<sup>3</sup>长沙麦融高科股份有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年6月21日; 录用日期: 2022年7月22日; 发布日期: 2022年8月12日

## 摘要

在2030“碳达峰”及2060年的“碳中和”背景下, 各行业纷纷出台各项标准与应用低碳技术以响应国家政策。而IDC (Information Data Center)机房其能耗呈井喷式增长, 节能降耗迫在眉睫。针对该形式, 日前省发改委出台了“数据中心及5G基站”低碳行动方案。热管自然冷却是降低这一能耗的有效方法之一。本文针对长沙地区某联通机房热管空调改造项目进行建模分析, 并以实测值验证。结果表明, 该系统的节能率约为38%。这是一项值得在全国范围推广的技术。

## 关键词

碳达峰, 碳中和, 联通机房, 热管空调, 节能率

# Energy Saving Analysis of Heat Pipe Air Conditioning Transformation in a Unicom Machine Room in Changsha

Rong Qi<sup>1</sup>, Feihu Chen<sup>2,3</sup>, Zhixin Yang<sup>3</sup>, Li Xing<sup>3</sup>, Shuguang Liao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hunan Commodity Quality Inspection and Research Institute, Changsha Hunan

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

<sup>3</sup>Changsha Mairong High-Tech Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Jun. 21<sup>st</sup>, 2022; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2022; published: Aug. 12<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Under the background of “carbon peak” in 2030 and “carbon neutralization” in 2060, the form of energy conservation in various industries is severe. The energy consumption of IDC (Information Data Center) room is increasing in a blowout mode, so it is urgent to save energy and reduce consumption. In view of this form, the provincial development and Reform Commission recently issued a low-carbon action plan of “data center and 5G base station”. Natural cooling of a heat pipe is one of the effective methods to reduce this energy consumption. This paper analyzes the modeling of a heat pipe air conditioning transformation project in a Unicom room in Changsha, and verifies it with the measured values. The results show that the energy saving rate of the system is about 38%. It is a technology worthy of nationwide promotion.

## Keywords

Carbon Peak, Carbon Neutralization, Unicom Machine Room, Heat Pipe Air Conditioning, Energy Saving Rate

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

近年中国数据中心的能耗从占全社会用电量的 1%，上升到 1.5%，然后是 2.35% [1]。年均增长达到 50% 以上。据估计，未来 3 年这一数据将与 5G 基站持平，达到 6% 左右 [2]。数据中心的节能方式主要可分为热管自然冷却方式、相变技术以及其他特朗勃墙体、冷辐射板等集成技术 [3]。热管技术因其高效、结构简单和故障率低等原因被广泛应用 [4]。本课题组针对长沙某电信机房热管节能改造项目，提出了反应系统的实际运行过程的热力学分析方法，并对改造前后的全年能效进行了建模和计算。结果表明全年节能约 300 万 kW·h [5]。利用热力学模拟软件 CYCLEPAD 建立了数据中心热管系统的仿真模型，以湖南常德某 IDC 机房 (111°39'E, 29°00'N) 72 台背板热管空调为对象，进行了全年能耗计算，与机房使用传统的空调系统进行了对比分析。结果表明，采用背板热管用电量节省了 26%。并根据全国主要城市的使用时间计算了使用热管空调系统的节能率 [6]。根据全国十个典型城市的室外气象参数，提出了便于计算的统计求和的简化算法。然后将长沙某数据中心的实际运行数据对计算模型进行了验证，重力热管型双循环空调可比冷水机组节能约 34%。计算模型的精度为 12%，达到工程精度要求的范围 [7]。自然冷却技术方面，吕继祥等基于数据中心空调系统的选型和节能设计，以风冷直膨式机组、风冷双冷源冷水机组和热管复合式制冷机组为研究对象，建立了三种类型空调系统的能效计算模型。提出一种新型机械制冷/回路热管一体式机房空调系统。利用三介质换热器将机械制冷回路和回路热管耦合起来，实现了二者的同时或单独工作，避免了现有系统依赖电磁阀切换带来的可靠性隐患。利用焓差实验台对系统性能进行了实验研究 [8]。研究方法则为建模与实验研究。实验研究方面，钱晓栋等结合数据机房环境的特点，选取 R22 和 R134a 为工质，实验研究了数据机房热管空调系统的换热性能和工质的最佳充液率 [9]。刘书浩等进行了理论分析背板空调运行中的不平衡问题，并且通过试验进行应用性研究 [10]。

仿真建模与实验工作工作量大，周期长。特别是对联通机房的改造案例较少。本文以热力系统仿真实验室 CYCLEPAD 为平台，通过软件自带的模块搭建系统仿真模型，软件可以进行计算和实现参数敏

感性分析。将对长沙某联通机房空调进行建模。该机房位于湖南省长沙市天心区友谊路 380 号公司办公楼 2~5 楼内, 现有综合机房、移动机房、传输机房、交换机房等共计 7 个机房。将计算系统热管改造的能效与火用效率, 并与传统机房精密空调进行对比。

## 2. 热管空调系统的物理模型

### 2.1. 项目概况

#### A) 原系统

友谊路局房目前在网的 23 台功率 10 kW 及上的空调, 运行时间多在 4 年以上, 能效下降, 只能勉强满足机房制冷需求。

#### B) 热管改造方案

本项目拟采用带自然冷却制冷系统 + 热管空调末端的方案, 对机房原空调系统进行降噪、节能改造, 改造空调系统包含整个系统由冷源设备、冷量分配单元(CDU, Cooling Deliver Unit), 即水氟换热器和热管空调末端。冷源设备采用双冷源配置: 在冬季及过渡季节, 当室外湿球温度低于  $6^{\circ}\text{C}$  时, 系统开启自然冷源运行模式, 此时依靠冷却塔制取的  $12^{\circ}\text{C}$  的冷却水通过板式换热器冷却冷冻水回水, 直接提供  $14^{\circ}\text{C}$  的冷冻水, 如图 1 所示; 当室外湿球温度不满足自然冷源利用条件时, 系统开启机械制冷运行模式, 水冷机组启动。热管系统改造明细如表 1 所示。

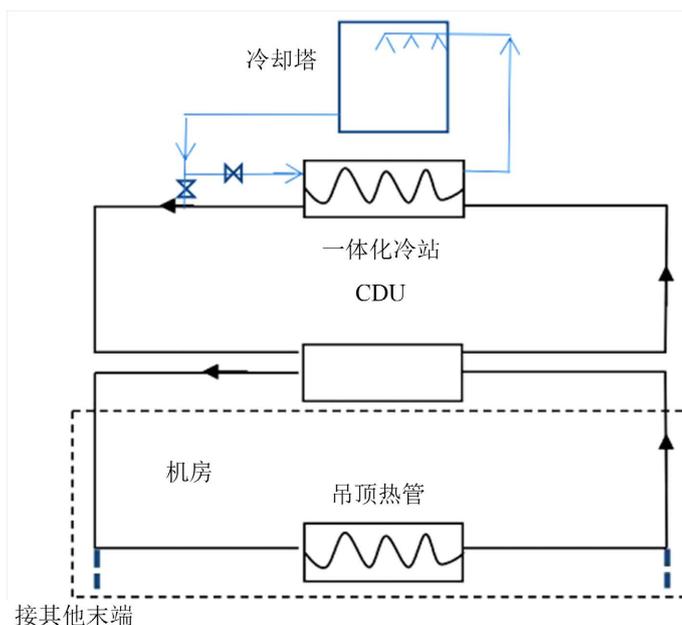


Figure 1. The ceiling heat pipe system diagram of a Unicom machine room  
图 1. 某联通机房吊顶热管系统图

Table 1. The list of equipment for heat pipe system transformation

表 1. 热管系统改造设备明细表

序号	名称	型号	数量
1	一体化冷冻站	600 kW	2 台
2	吊顶热管	20 kW	61 台
3	冷量分配单元(CDU)	80 kW	19 台

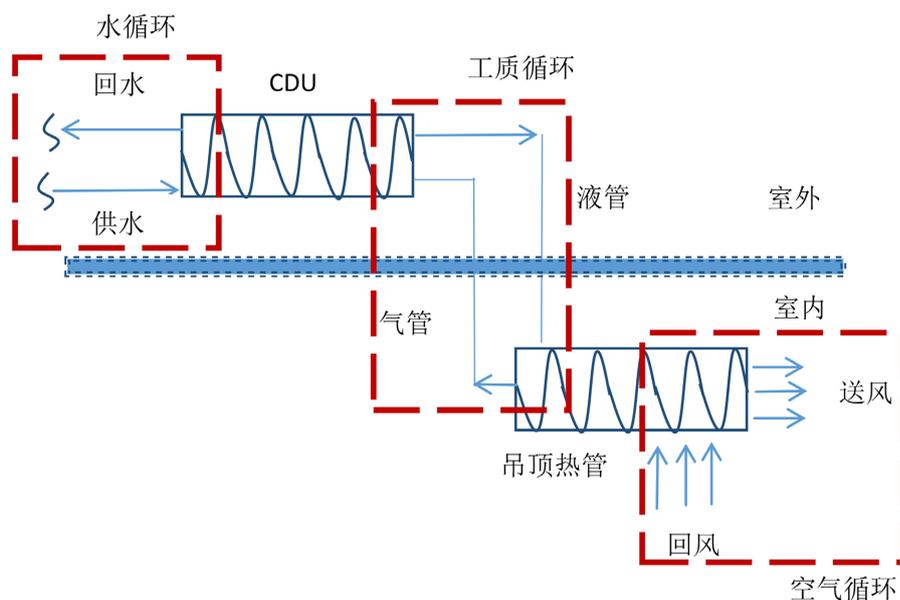
夏季室外干球温度为 35.4℃，设计空调室内温度为 24℃，湿度 50%。

## 2.2. 制冷主机 + CDU + 背板热管模式

当室内外温差小于 6℃时，制冷主机开启，通过供应的冷水与热管工质在 CDU 中进行换热，带走机房散发的热量，并通过冷凝器将热量排放到室外环境中。如图 1。

## 3. 一体化冷站 + CDU + 吊顶热管末端模式的 CYCLEPAD 仿真模型

一体化冷站 + CDU + 吊顶热管末端模式包括三个子循环。第一个循环是工质相变循环：液态在吊顶热管吸收热量变成气态，进入 CDU 经冷水冷却后变成液态，重新进入吊顶热管，如图 2。在这个循环中，液态制冷剂(R134a)在吊顶热管中吸收 IT 服务器的热量，变成气态，并进入 CDU，被冷水冷却后变成液态，形成一个循环。



**Figure 2.** The system diagram of integrated cold station + CDU + ceiling heat pipe  
**图 2.** 一体化冷站 + CDU + 吊顶热管的系统图

第二个循环是冷水循环：一体化冷站提供 14℃的冷水，在 CDU 中吸收气态工质的热量，温度上升到 19℃。如图 2。

第三个循环是室内空气的循环：IT 服务器散发的热量进入空气，空气温度升高(S5)，在吊顶热管末端释放热量，温度降低，然后回到机房。回风(约 37℃)被吊顶热管(HX2)中冷却后，温度降到 21℃左右，并送入机房。如图 2 所示。

其中，可以计算得出，一体化冷站的供水流量为 57.36 kg/s，热管工质的流量为 6.55 kg/s，风机的风量为 74.74 kg/s。制冷剂管道的压力为 556.1 kPa。

## 4. 热管循环的耗电量与传统模式的对比

### 4.1. 热管系统的耗电量

根据长沙地区的气象温度分布表可以得出热管系统的应用时间，如表 2 所示。

**Table 2.** The average outdoor meteorological temperature ( $\bar{t}_a$ ) distribution of IDC machine room**表 2.** IDC 机房平均室外气象温度( $\bar{t}_a$ )分布表

温度 $T$ 区间	$\geq 30^\circ\text{C}$	$\geq 20^\circ\text{C}, < 30^\circ\text{C}$	$\geq 10^\circ\text{C}, < 20^\circ\text{C}$	$\geq 0^\circ\text{C}, < 10^\circ\text{C}$	$< 0^\circ\text{C}$
温度分布系数	11.5%	33.3%	27.1%	26.2%	1.9%

由上述数据可知, 该地区全年约有 49.3% 的时间可使用热管空调。其中, 完全自然冷却的时间约为 120 天。部分冷却的时间约为 60 天。

耗电量由三部分组成:

#### 1) 自然冷却模式

水冷系统完全自由冷却时, 主机停机, 系统能耗共 96.6 kW。

$$96.6 \times 24 \times 120 = 27.8 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$$

#### 2) 机械制冷模式

$$296.6 \times 24 \times (365 - 120 - 60) = 131.7 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$$

#### 3) 混合制冷模式

耗电约为压缩机耗电与风机耗电之和。

重力热管型空调的混合工况运行的条件为: 室外干球温度:  $34^\circ\text{C} \sim 24^\circ\text{C}$ 。以长沙地区为计算示例, 长沙地区室外干球温度  $25^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$  的时间约为 60 天, 小时数为 1440 小时。根据长沙地区的室外气象参数表, 将长沙地区室外干球温度  $34^\circ\text{C} \sim 24^\circ\text{C}$  的区间以泰勒级数表示。

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n = f(x_0) + f'(x_0)(x' - x_0) + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n + \dots \quad (1)$$

其中,  $x$  为室外干球温度,  $^\circ\text{C}$ 。

热管的节能率为热管自然冷却的比例除以混合工况运行的时间周期。

$$\text{热管的节能率} = \frac{\int_0^{\tau} (34 - \dot{T}) dt}{\tau} \quad (2)$$

其中,  $\tau$  为混合工况运行的时间周期; 34 为混合工况运行的边界最高值,  $^\circ\text{C}$ ;  $\dot{T}$  为混合工况运行的逐时室外干球温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t$  为运行时间, s。

公式 1 和 2 构成了热管节能率的连续计算模型。

将气象参数作为输入参数, 计算得出部分冷却时耗电为压缩机全开时耗电的 30% 左右。

$$1440 \text{ h} \times 296.6 \times 30\% = 12.8 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$$

$$\text{总电耗} = 27.8 \text{ 万} + 131.7 \text{ 万} + 12.8 \text{ 万} = 172.3 \text{ 万 (kW} \cdot \text{h)}$$

## 4.2. 传统空调的年耗电量

机组每年的耗电量:  $354.6 \times 24 \times 365 = 310.59 \text{ 万 (kW} \cdot \text{h)}$

节能率:  $(310.59 - 172.3) / 310.59 = 44.5\%$

## 4.3. 节能效率验证

为了验证所建模型的误差, 对改造后的模式进行了节能率对比, 如表 3 所示。

**Table 3.** Comparison of test data (test time: July 2021)  
**表 3.** 测试数据对比(测试时间: 2021 年 7 月)

序号	模式	72 小时用电量	节能率
1	节能模式	1684.79 kW·h	38%
2	传统模式	2675.72	

#### 4.4. 误差分析

计算模型与测试误差按下式计算:

$$\sigma = \frac{\text{计算值} - \text{测试值}}{\text{测试值}} \times 100\% \quad (3)$$

代入数据:

$$\sigma = \frac{44.5 - 38}{44.5} \times 100\% = 14.6\%$$

本计算模型达到工程要求的精度。

### 5. 结论和展望

1) 为降低数据中心内空调系统的能耗, 本文提出重力热管型空调, 通过和传统空调的对比分析该空调系统的节能效果。以长沙地区的气候为例, 混合制冷模式的节能率约为 30%。在长沙某联通机房数据中心内的实际运行效果表明, 重力热管型双循环空调可传统机组节能约 38%。

该计算模型可以为决策者选择方案时提供依据。

2) 对于小型机房如边缘计算机房、中小型数据中心, 单机架功耗不超过 15kW 时, 采用吊顶形式重力热管型双循环空调, 封闭热通道, 最大限度地提高空调回风温度, 能够大大降低数据中心内的 PUE 值。此外, 对比数据中心常规方案, 重力热管型空调在部署上具有一定的柔性, 颗粒度小、能够灵活调整、可以节约占地面积、安全可靠高。

3) 该计算模型中应采用逐时的室外气温作为输入值, 然后采用节能率的积分模型能反应系统的实际运行情况。提出了热管节能率的连续计算模型, 该方法可以为该类热力学系统计算做参考。

4) 由计算模型与测试验证结果表明, 该系统节能率高, 是值得在全国范围内广泛推广的技术。

### 参考文献

- [1] 陈飞虎, 周新力, 廖曙光. 重力热管型双循环空调在夏热冬冷地区应用探讨[J]. 暖通空调, 2022, 51(1): 152-155
- [2] 张文俊, 张素芳, 王晓桦, 乔军晶, 张晶, 孔维鉴. 点亮绿色云端: 中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究[R]. 保定: 国际环保组织绿色和平与华北电力大学, 2020.
- [3] 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(4): 1105-1112
- [4] 王铁军, 赵丽, 吕继祥, 等. 热管复合式制冷机组的研发与应用[J]. 制冷学报, 2016, 37(4): 65-69.
- [5] 陈飞虎, 廖曙光. 某电信机房节能改造全年能效的热力学分析[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(10): 55-58
- [6] 陈飞虎, 廖曙光, 龚光彩, 等. 数据中心热管空调系统仿真研究——基于热力学模拟软件 CYCLEPAD [J]. 洁净与空调技术, 2020(4): 27-33.
- [7] 王子彪, 熊伟, 刘艺唯, 等. 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, 15(9): 71-74+80.
- [8] 吕继祥, 王铁军, 赵丽, 等. 基于自然冷却技术应用的数据中心空调节能分析[J]. 制冷学报, 2016, 37(3):

113-118.

- [9] 钱晓栋, 李震, 李志信. 数据机房热管空调系统的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(7): 1217-1220.
- [10] 刘书浩, 张海涛, 郭佳哲. 数据中心热管背板空调应用实测研究——系统不平衡运行分析[J]. 制冷与空调, 2015, 15(3): 22-25+12.