

# Technology Pathways, Economic Benefits, and Case Studies of Waste Heat Recovery in Data Centers

Jinlong Yao

Green Integrated Technologies Co.Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

## Abstract

As high-energy-consumption infrastructure supporting the digital economy, data centers face growing scrutiny due to their substantial energy use and carbon emissions. Waste heat recovery technology, integrated with heat pump systems, upgrades low-grade waste heat for heating and domestic hot water, emerging as a key carbon-reduction solution. This study systematically examines the principles of waste heat recovery, compares heat extraction from chilled versus cooling water, addresses engineering challenges like online retrofitting and control integration, and analyzes economic benefits through case studies. Results demonstrate that this approach can reduce PUE, with a payback period of 2–4 years, proving to be an efficient pathway for green transformation of data centers.

## Keywords

Data Center; Waste Heat Recovery; Water-Source Heat Pump; Energy Efficiency; PUE; Economic Benefit

## 数据中心余热回收技术路径、经济效益与案例分析

姚金龙

国霖技术有限公司, 中国·辽宁 大连 116000

## 摘要

数据中心作为数字经济的核心高载能基础设施,其巨大的能耗与伴随产生的碳排放问题日益受到关注。在此背景下,余热回收技术通过集成热泵系统,将数据中心排放的低品位废热提质后用于供暖、生活热水等场景,成为实现节能降碳的关键路径。本文系统梳理了该技术的原理,重点对比了从冷冻水与冷却水两种取热方案的技术特性与适用性,深入剖析了在实际改造中面临的在线施工、系统控制集成、管道防腐等工程难点及其针对性解决方案,并结合多个典型项目案例,量化分析了其节能潜力与经济效益。研究表明,有效实施余热回收可助力数据中心PUE值降低,项目投资回收期通常为2至4年,具备显著的经济与环境效益,是推动数据中心绿色低碳转型的可靠且高效的技术手段。

## 关键词

数据中心; 余热回收; 水源热泵; 能效; PUE; 经济效益

## 1 引言

近年来,数据中心行业伴随着数字经济的迅猛发展而快速扩张,其能耗问题及其对环境的影响日益成为关注焦点。数据中心内部IT设备需全年不间断运行,产生了大量的热量,制冷系统在维持机房环境时,将IT设备产生的大量低品位废热直接排向大气,不仅造成了能源的巨大浪费,也加剧了城市的“热岛效应”和碳排放压力。在此背景下,余热回收技术被视为提升数据中心能源利用效率、降低运行成本、减少碳排放的关键技术之一。该技术核心在于利用热泵等设备,将数据中心排放的低品位废热进行回收并提升其品质,用于满足数据中心园区自身或周边区域的采暖、生活热水、甚至工艺加热等需求,实现能源的梯级利用,变“废”

为“宝”。本文结合工程实践,探讨技术细节与实施策略,为行业提供参考。

## 2 技术原理与系统构成

数据中心余热回收的技术核心是热泵技术,特别是水源热泵。热泵的工作原理类似于反向运行的制冷机,它通过消耗少量电能,驱动制冷剂循环,从低温热源(如数据中心的废热)中吸收热量,然后将热量传递给高温热媒(如供暖热水)。其制热性能系数(COP, Coefficient of Performance)通常可达4.0-5.0甚至更高,意味着消耗1单位电能,可以搬运4-5单位的热能,能效远高于直接电加热( $COP \leq 1$ )或常规燃气锅炉(热效率通常低于1.0)。

技术路径的选择关键在于热源的选取方式,这直接决定了系统效率、复杂度和适用性。目前主流方案主要分为从冷冻水系统取热和从冷却水系统取热,也可从机房空调回风取热。

【作者简介】姚金龙(1988—)男,中国吉林永吉人,本科,工程师,从事暖通空调设计研究。

## 2.1 热源方案比较

**冷冻水取热：**该方式较为常见。其热源来自为数据中心室内降温后的空调冷冻水回水。由于这部分水直接吸收了机房内 IT 设备散发的热量，温度相对稳定（通常设计回水温度在 18℃ 左右，实际运行中可能更高）。特别是在冬季，当数据中心需要利用自然冷源（如冷却塔免费制冷）时，冷却水温度可能很低，而此时冷冻水因始终承担机房散热任务，温度相较于冷却水反而更高，更有利于热泵高效运行。高温冷冻水回水部分或全部流经热回收板式换热器，将热量传递给热泵机组的源水侧，降温后再进入制冷主机或自然冷却板换，其系统原理如图 1 所示。

这种方式的优点是热源温度相对稳定，热回收效率高，且与冷却塔系统解耦，在过渡季和冬季运行时互不干扰。缺点是需在冷冻水系统上增加接口和控制阀门，系统耦合度略高。

**冷却水取热：**该方式直接从冷水机组的冷凝器侧，即冷却水回水管路中提取热量。冷却水携带了数据中心几乎全部的散热量（IT 负载 + 压缩机功耗），热量规模巨大。其温度水平（通常为 30℃ -40℃）高于冷冻水，理论上热泵提升温差更小，效率可能更高。这种方式适用于空调系统未设置自然冷却模式或需要全年进行余热回收的场景。优点是改造相对简单，热量输出大。缺点是冷却水温度受室外气候（尤

其是湿球温度）影响波动大，冬季温度可能较低；且余热回收会与冷却塔散热产生冲突，需要精细控制来平衡，可能影响自然冷却的利用时长。此外，冷却水水质通常比冷冻水差，对换热设备可能提出更高要求。

**回风余热回收：**除上述水侧回收方式外，也存在从机房空调回风（通常 35℃ -45℃）中直接回收热量的方式。这种方式通常在空气处理单元前加装热回收装置（如转轮式、板翅式换热器），回风先经此装置预热新鲜空气或加热其他工质后再被冷却。这种方式更直接，但可能增加风道阻力，且热量输送距离受限。在实际大型数据中心中，水侧回收因便于长距离输送和集中利用，应用更为普遍。

## 2.2 典型应用场景

余热回收技术可灵活应用于多种场景，经济效益显著。主要应用包括：

**办公区供暖：**替代传统的电锅炉或燃气锅炉，大幅降低供暖成本。

**提供生活热水：**用于园区食堂、浴室等，实现能源循环利用。

**柴油发电机预热：**替代效率低下的电加热器（水套式加热器），确保发电机在低温环境下顺利启动，同时显著节能。改造原理图见图 2。

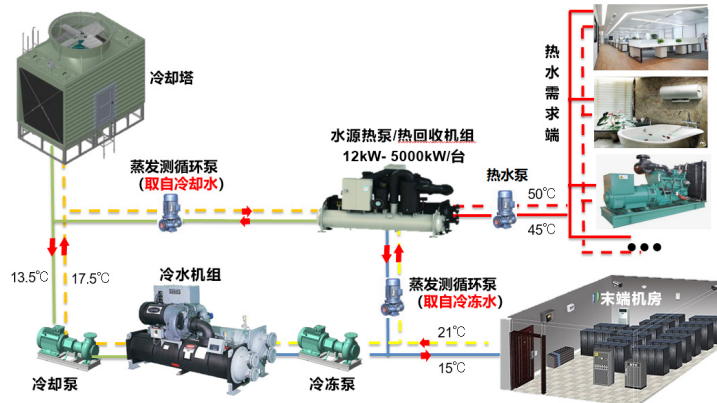


图 1 余热回收热源侧改造原理图（示意冷冻水 / 冷却水取热）

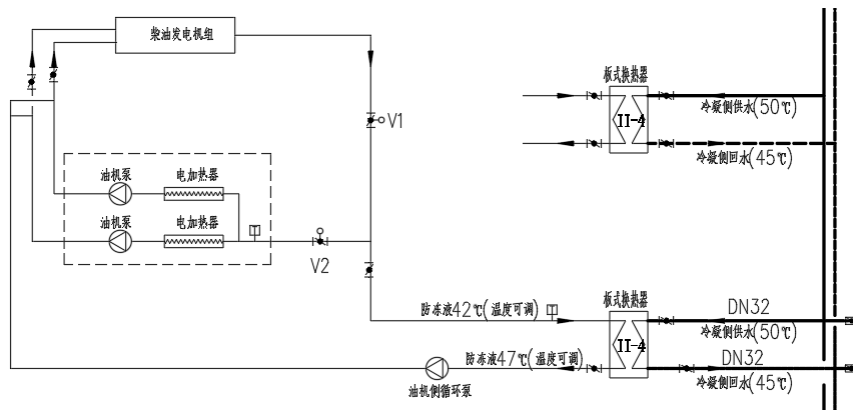


图 2 柴油发电机预热改造系统原理图

### 3 工程实施重点与对策

在已运营的数据中心实施余热回收改造，需确保业务不中断，面临三大核心挑战：

**在线改造：**所有施工必须在不影响数据中心正常运行的前提下进行。对策包括：进行充分的前期论证和方案设计，采用分阶段、分区域施工的策略，最大限度减少对现有机房环境的影响；大力推广使用预制化管道和模块化设备，将管道预制程度提升至90%以上，从而大幅缩短现场切割、焊接等高风险作业时间；同时，必须制定完善、详尽的应急预案，以应对可能出现的突发状况。

**管道防腐：**热回收系统常采用热镀锌钢管以保证使用寿命。现场切割焊接会严重破坏镀锌层，导致焊点位置易腐蚀。根本对策是依靠工厂化预制，所有管道在工厂内完成下料、套丝、焊接（必要时）和热镀锌处理，运至现场后仅进行快速组装连接，最大限度减少现场动火作业，保证管道系统的整体防腐效果。

**自动控制：**余热回收系统并非独立运行，它需要与数据中心原有的冷源系统、备用发电机组等安全、协同工作。这对控制系统的智能化水平提出了高要求。对策是定制开发智能控制算法，不仅要实现供回水温度的精准控制，保障供热稳定，更要实现安全的系统联锁保护。例如，需确保余热回收系统为柴油发电机预热时，不会与发电机自带的循环泵控制逻辑发生冲突；在过渡季节，需智能判断和切换自然冷却与机械制冷的模式，并与热回收系统进行协调，避免相互制约。

### 4 典型案例分析与经济效益

案例数据表明，余热回收在不同场景下均能实现显著节能，具体见表1。

表1 典型案例经济效益汇总

案例场景	热回收规模	年节约费用 (万元)	PUE降低	投资回收期 (年)
柴发预热 (33台)	160 kW	53.85	-	2.9
值班室供暖	12 kW	2.19	-	3.4
柴发机房供暖 + 柴发预热 (10台)	120kW	28.58	-	3.6
替代低效冷源, 冬季为园区供暖	2500 kW	286.15	0.1	2

数据来源：已实施改造项目实际数据。

**案例1 (柴发预热)：**原33台柴油发电机采用电加热器预热，年耗电81.4万kWh。改造后采用水源热泵(COP=4.3)，年耗电降至13.25万kWh，年节省电费53.85万元，投资回收期2.9年。

**案例2 (值班室供暖)：**采用水源热泵(COP=4.3)替代电加热为值班室供暖，年节省电费2.19万元，投资回收期3.4年。

**案例3 (柴发机房供暖 + 柴发预热)：**利用现有热泵机组，通过回收数据中心冷冻水侧的低温热源，利用水源热泵机组将其转化为高温水源后为柴油发电机组提供预热服务

以及柴油发电机房冬季供暖。年节省电费24.8万元。此外，余热回收过程中还减少了数据中心制冷系统的能耗，间接节省电费3.78万元。项目年总节约电费达28.58万元，投资回收期约3.59年。

**案例4 (系统替代)：**采用高效水源热泵机组(2500kW)替代原有的低效风冷制冷系统，并实现冬季为办公区供暖。全年节能收益达286.15万元，PUE降低0.1，投资回收期仅2.0年。

### 5 结语

通过对数据中心余热回收技术的深入分析和案例研究，可以得出以下结论。首先，技术路径成熟可行。数据中心余热回收，特别是基于水源热泵的技术路径已经清晰。冷冻水取热和冷却水取热两种方案各有优缺点，需根据数据中心具体架构、气候条件、热需求特性等因素综合比选，冷冻水取热在稳定性和热回收效率方面往往更具优势。其次，经济效益显著。余热回收项目具有优良的经济性。无论是针对柴发预热、区域供暖等局部应用，还是进行系统级的冷热源替代，典型项目的投资回收期大多可控制在2-4年之内，属于经济性很好的节能技改项目。再者，节能降碳效果突出。余热回收能有效降低数据中心的PUE指标，提升能源利用效率。相比传统供暖方式，它能大幅降低能耗和温室气体排放，对实现“双碳”目标具有直接贡献。最后，工程实施是关键。成功的余热回收改造依赖于精细的工程设计和高水平的项目管理，重点在于解决在线改造、管道防腐和智能控制等难点，确保数据中心主业安全万无一失。

展望未来，数据中心余热回收技术的发展和前景广阔。热泵等核心设备的能效(COP)仍有提升空间，更高能效的设备将带来更好的经济效益。余热回收不应仅限于数据中心内部利用，未来应积极探索与区域能源系统的深度融合，将稳定、大量的余热接入城市供热管网，为更广阔范围的建筑提供清洁热源，最大化其社会和环境效益。此外，相关的政策引导、技术标准规范以及碳排放交易机制等，也将对推动余热回收技术在数据中心行业的规模化、规范化应用起到至关重要的促进作用。随着技术的不断进步和政策的持续支持，数据中心余热回收必将成为绿色数据中心建设中不可或缺的一环。

### 参考文献

- [1] 冯琢.大型绿色装配建筑暖通空调系统节能技术优化[J].制冷与空调(四川), 2022, 36(1).
- [2] 季莹, 赵志远, 章继刚, 智能时代下的数据中心[J].网络安全和信息化, 2018, (05)
- [3] 袁洪.数据中心空调节能技术的应用与研究[J].低碳世界, 2022, 12(07): 118-120.
- [4] 张硕, 黄英, 李河, 等.数据中心利用余热回收实际案例分析[J].洁净与空调技术CC&AC, 2025,(1).
- [5] Ebrahimi K, Jones G F, Fleischer A S. Thermo-economic analysis of steady state waste heat recovery in data centers using absorption refrigeration[J]. Applied Energy,2015,139.