

多场协同的综合能源系统节能改造效益评价探讨

班璐¹, 吴庆敏², 王松³, 陈波³, 孙宁², 王轩⁴, 张轩昂⁵, 宋江⁶, 韩义勇¹,
范毅^{1*}

¹南宁学院交通运输学院, 广西 南宁

²广西联洋数智节能科技有限公司, 广西 南宁

³广西自贸试验区南宁片区达富智能科技有限公司, 广西 南宁

⁴天津大学机械工程学院, 天津

⁵中国科学技术大学工程科学学院, 安徽 合肥

⁶黑龙江八一农垦大学工程学院(航空学院), 黑龙江 大庆

收稿日期: 2025年7月26日; 录用日期: 2025年8月18日; 发布日期: 2025年8月26日

摘要

在能源系统低碳化转型背景下, 本文以A公司为例, 基于多场协同理论框架, 探讨多场耦合调节变频技术驱动制冷、热水、采暖系统的跨场域节能改造, 并通过构建热力场、流体场与电力场的动态耦合模型, 结合智能群控与多场耦合调节变频设备, 优化多物理场能量匹配。经过本文提出的多场协同多场耦合调节变频技术改造, 制冷系统散热效率提升了20%, 热水系统废热利用率达75%, 采暖系统能效比提高至3.5, 全局综合节能率达30%, 年运行成本降低476万元。能耗与经济分析表明, 在同等供能前提下, 多场耦合调节变频技术通过跨场域协同显著降低能耗冗余, 验证了“场域解耦、能耗协同”的有效性。本研究为工业与建筑领域节能改造提供了理论支撑与实践范例。

关键词

多场协同, 综合能源, 节能改造

Discussion on the Evaluation of the Benefits of Energy-Saving Transformation of Multi-Field Synergistic Integrated Energy System

*通讯作者。

文章引用: 班璐, 吴庆敏, 王松, 陈波, 孙宁, 王轩, 张轩昂, 宋江, 韩义勇, 范毅. 多场协同的综合能源系统节能改造效益评价探讨[J]. 可持续能源, 2025, 15(4): 74-82. DOI: 10.12677/se.2025.154009

Lu Ban¹, Qingmin Wu², Song Wang³, Bo Chen³, Ning Sun², Xuan Wang⁴, Xuan'ang Zhang⁵, Jiang Song⁶, Yiyong Han¹, Yi Fan^{1*}

¹College of Traffic and Transportation, Nanning University, Nanning Guangxi

²Guangxi Lianyang Digital Intelligence Energy Saving Technology Co., Ltd., Nanning Guangxi

³Dafu Intelligent Technology Co., Ltd., Nanning Area, Guangxi Pilot Free Trade Zone, Nanning Guangxi

⁴School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin

⁵School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui

⁶College of Engineering (College of Aviation), Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing Heilongjiang

Received: Jul. 26th, 2025; accepted: Aug. 18th, 2025; published: Aug. 26th, 2025

Abstract

In the context of the low-carbon transformation of the energy system, this paper takes Company A as an example, based on the theoretical framework of multi-field synergy, discusses the cross-field energy-saving transformation of refrigeration, hot water and heating systems driven by multi-field coupling variable frequency conversion technology, and optimizes the multi-physics energy matching by constructing a dynamic coupling model of thermal field, fluid field and electric field, combined with intelligent group control and multi-field coupling to regulate frequency conversion equipment. After the transformation of the multi-field collaborative multi-field coupling adjustment and frequency conversion technology proposed in this paper, the heat dissipation efficiency of the refrigeration system is increased by 20%, the waste heat utilization rate of the hot water system is increased by 75%, the energy efficiency ratio of the heating system is increased to 3.5, the global comprehensive energy saving rate is 30%, and the annual operating cost is reduced by 4.76 million yuan. The analysis of energy consumption and economy shows that under the premise of the same energy supply, the multi-field coupling adjustment frequency conversion technology significantly reduces the energy consumption redundancy through cross-field coordination, which verifies the effectiveness of "field decoupling and energy consumption coordination". This study provides theoretical support and practical examples for energy-saving renovation in the field of industry and construction.

Keywords

Multi-Field Synergy, Comprehensive Energy, Energy-Saving Transformation

Copyright © 2025 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

在能源系统低碳化转型进程中, 2025 年 5 月国务院办公厅发布的《2024~2025 年节能降碳行动方案》明确了未来两年节能降碳的具体措施与目标, 强调技术创新和能源结构优化对提升全要素能源效率的关键作用[1][2]。尽管对于产业改造已有诸多研究, 但聚焦于多场耦合调节变频技术在节能调节中应用的探索仍然存在一些不足之处。多场协同是指多个物理场(如电磁场、温度场、应力场、流场等)在复杂系统中通过相互作用、耦合及动态调整, 实现系统整体性能最优的多学科设计方法。其核心在于突破单一物理场的孤立分析, 强调不同场之间的能量传递、信息交换与动态平衡, 通过协同机制提升系统效率、稳定

性或功能创新。本文验证了多物理场协同优化在酒店节能改造中的实践价值[3][4]，相较于现有建筑能源管理系统(BEMS)的设备级监控与模型预测控制(MPC)的时序优化，本研究首次实现热力场梯度、流体场压力、电力场功率的协同反馈，通过“场域解耦”降低系统惯性影响，结合“能耗协同”提升动态匹配精度，并进行了工业级规模验证，为后续研究提供的新方法。

2. 多场协同的物理内涵与技术逻辑

2.1. “多场”定义与场域边界

热力场：热力场是一种基于微分几何与群论的非平衡热力学框架，将物理量及其演化重构为几何对象，通过对称性约束协变性方程，为温度梯度驱动系统的能效优化提供几何化分析工具[5](如废热回收、散热控制)；

流体场：通过介质流动与压力分布传输能量(如水循环系统、管道阻力优化)；

电力场：电能分配与设备调控(如多场耦合调节变频器节电、智能控制)。

2.2. 多场耦合调节变频技术的多场协同调控逻辑

多场耦合调节变频技术的核心逻辑在于实现热力场、流体场与电力场的动态协同，通过跨场域的能量优化提升系统整体效率。其调控逻辑围绕三个关键机制展开：

动态匹配机制：基于实时负荷需求，变频技术动态调节设备运行状态。例如，在制冷系统中，冷却水泵和风机的转速根据温度梯度变化自动调整，避免能源供需失衡。这种精准匹配减少了无效能耗，确保设备仅在必要时运行，从而优化电力场功耗并稳定热力场散热效率。实际应用中，通过智能群控系统实现毫秒级响应，显著提升能源利用率。

跨场能量迁移机制：技术突破场域界限，实现能量回收与再利用。制冷系统产生的废热被迁移至热水系统，通过板式换热器建立热传递通道，将原本浪费的热能转化为有效能源。例如，提高了废热回收率，减少了对传统热源的依赖，体现了热力场与流体场的无缝协同。这种迁移不仅降低能源冗余，还强化了系统可持续性。

系统稳定性机制：通过避免设备频繁启停，变频技术维持系统长期稳定运行。在采暖系统中，动态调节水流量匹配建筑热需求，减少压力波动和设备磨损。这降低了维护成本并延长设备寿命，确保多物理场在耦合过程中保持平衡。稳定性得益于热源与负荷的解耦控制，将系统惯性影响最小化。

多场耦合调节变频技术的核心作用路径：热力场驱动起始于温度梯度(如制冷废热或采暖需求)，触发能量流动并通过板式换热器建立热传递通道；随后进入流体场优化阶段，介质流动态调节水流量与压力分布，变频泵组实时匹配热需求以减少管道阻力损耗；最后通过电力场闭环，变频设备接收信号动态调整设备功率(如冷却塔风机转速)，实现协同控制，完成热力场→流体场→电力场的闭环反馈，最终达成跨场域能耗协同。

3. A 公司能源现状概述

A 公司的制冷系统、热水系统、采暖系统一直处于初期建设后的运行阶段。如今，由于设备老化，能源消耗量攀升，运维成本也随之增加。为了有效提升能源利用率，同时降低运营成本，A 公司迫切需要对这些系统进行多场协同的现代化改造，以实现绿色节能转型。其中，基于智能化控制技术的系统升级改造能实现对能耗的跟踪监测[6]，从而实现多场协同的目标研究表明，多场耦合调节变频控制技术在泵类系统的改造中具有节约电能、降低维护费用和延长设备使用寿命的优势，这些优势使该项技术成为提升泵类系统性能的重要技术选择[7]。基于此，该 A 公司决定对原先系统进行升级改造，升级改造后，技术路径如图 1 所示，以此实现节能降耗目标。

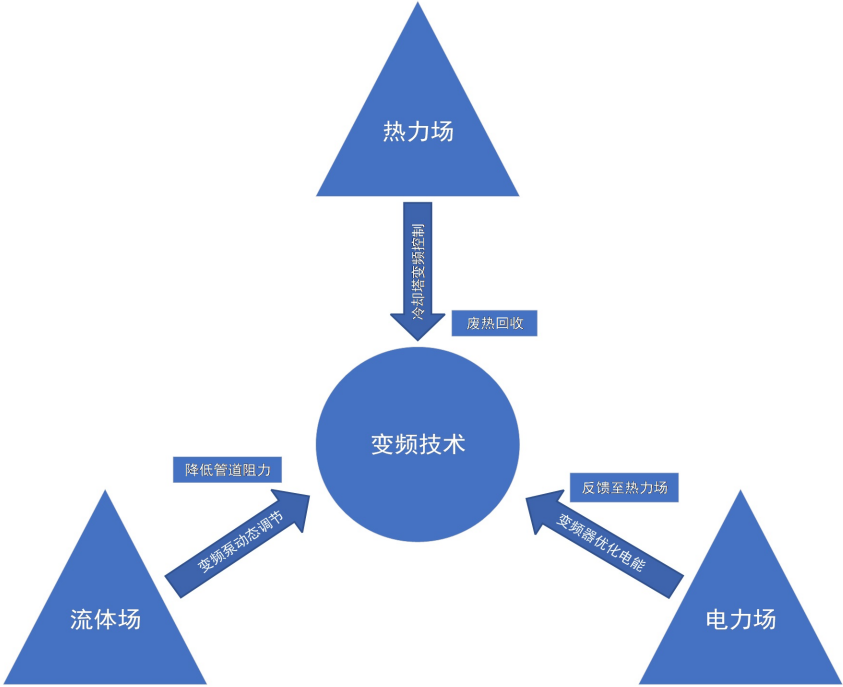


Figure 1. Schematic diagram of the action path of multi field collaboration and multi field coupling regulation frequency conversion technology
图 1. 多场协同与多场耦合调节变频技术作用路径示意图

4. 能源系统改造与升级

4.1. 原有系统设计

原系统设备将离心式冷水机组和螺杆式冷水机作为主要冷源系，热水锅炉和蒸汽锅炉作为主要的热源系统，原有冷热源系统架构如图 2 所示。A 公司分析具体的原有设备，并在此基础上，通过增加设备来实现升级改造，将原来独立的制冷、热水、采暖子系统通过以下改造实现多场协同。

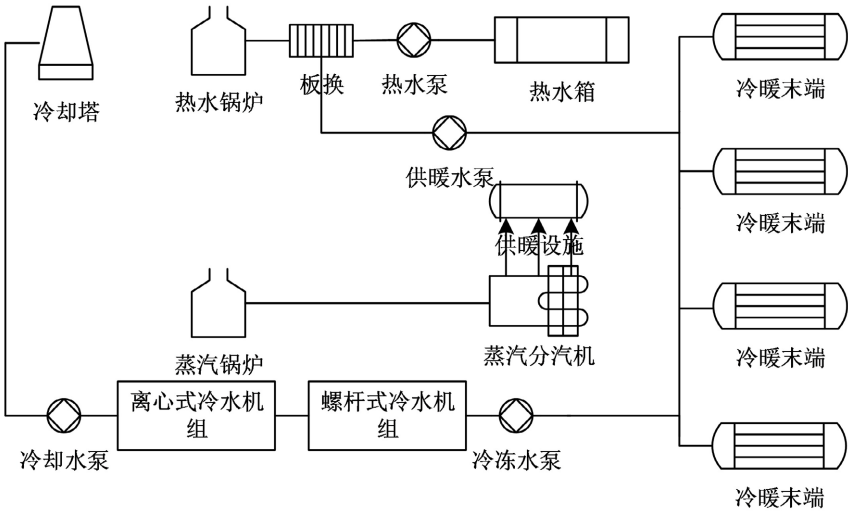


Figure 2. Architecture diagram of the original cold and heat source system of Company A
图 2. A 公司原有冷热源系统架构图

4.2. 改造后系统新增设备及其作用

4.2.1. 制冷系统多场协同优化

制冷系统的基本原理是通过热力学循环，将热量从低温物体转移到高温物体。常见的制冷循环包括蒸汽压缩制冷循环、吸收制冷循环等。这些循环通过压缩、冷凝、膨胀和蒸发等过程达到制冷效果，能够有效降低环境温度。冷却塔风机保持在定频高转速状态，系统通过调节水泵频率控制水温差，确保冷却塔和水泵的开启台数不超过冷水机组，以保障系统安全运行[8]。

制冷系统的工作原理本质上是温度场、压力场与流体场的动态耦合过程，故本次改造通过引入智能群控系统、多场耦合调节变频控制设备、冷却塔多场耦合调节变频控制等技术，优化了制冷系统的冷量控制和变流量运行。多场耦合调节变频设备动态调节冷却水泵与冷却塔风机转速，精准匹配负荷需求，既降低了电力场能耗，又提升了热力场散热效率，实现了电力场与热力场的跨场域协同。这一改造显著提高了能源利用效率，减少能源的消耗量。此举对企业实现绿色可持续发展具有重要作用。

4.2.2. 热水系统跨场域能量迁移

在热水系统中，基于多场协同理论构建了热力场 - 流体场 - 电力场的能量传递链：通过温度场梯度耦合，利用板式换热器建立焓传递通道；流体场采用多场耦合调节变频泵组动态调节流量，实现热回收速率与建筑热水负荷的时空协同；电力场通过 PI 控制器优化水泵功耗，使系统焓效率提升，形成跨场域能量品位升级的闭环控制。通过增设风冷热水模块机和多场耦合调节变频控制供水水泵，减少燃气锅炉依赖，达到替代传统的燃气锅炉。多场耦合调节变频技术根据负荷变化调节泵组和风机，降低能耗。如果系统始终在额定状态下运行，而不考虑末端负荷的变化，则将导致大量的能源浪费[9]。而本次设备的增加利用热回收技术将制冷、制热过程中产生的废热转化为热水系统的有效能源，减少传统热源消耗，从而降低了运营成本和对环境的影响。

4.2.3. 采暖系统多场动态平衡控制

采暖系统构建了热力场 - 流体场 - 建筑场的动态协同体系：基于建筑场热惯量模型解耦热源场与末端负荷的强耦合，通过多场耦合调节变频调速实现水流量与空间热流密度的精准匹配，建立压力场 - 温度场联合控制策略实现多物理场解耦控制，使系统响应时间缩短。此举减少 A 公司的经济成本以及提升能源利用率。

A 公司通过增设风冷热泵机组和多场耦合调节变频控制供热水泵，替换传统燃气热源，实现了更节能环保的供热方式。多场耦合调节变频技术根据末端冷热需求动态调节水流量，优化介质输送效率，降低管道阻力损耗，从而提升热力场与流体场的协同效率。这些措施显著提高了能源利用率，降低了运营成本，并减少环境污染。

改造后，A 公司能源系统新增设备及其作用如表 1 所示。

Table 1. New equipment and functions of Company A
表 1. A 公司新增设备及作用

序号	系统名称	新增的设备	新增设备的作用
1	制冷系统	智能群控系统	为现有设备进行起停控制
		多场耦合调节变频控制设备	完成各处末端变流量运行
		冷却塔的多场耦合调节变频控制	优化冷却效率并降低能耗
		冷却塔变流量喉管以及供水均压管	最大限度保证冷却塔的补水均匀

续表

2	热水系统	风冷热水模块机	利用空气中的热能，通过制冷剂循环系统进行热量交换，将热量转移到水中，从而加热水
		供水水泵的多场耦合调节变频控制	稳定整体的热水供水控制
3	采暖系统	风冷热泵机组	利用空气中的热能来制热
		供水水泵的多场耦合调节变频控制	完善采暖的变流量控制

4.3. 改造后系统

A 公司在原有多个能源系统的基础上加入多场耦合调节变频设备，使得能源管理系统更加智能化，能够根据实时负荷需求自动调整能源供应，减少无效能耗，实现能效最大化，提高了能源利用率，产生了更高的节能效益。A 公司设备的布置和系统架构如图 3 所示。

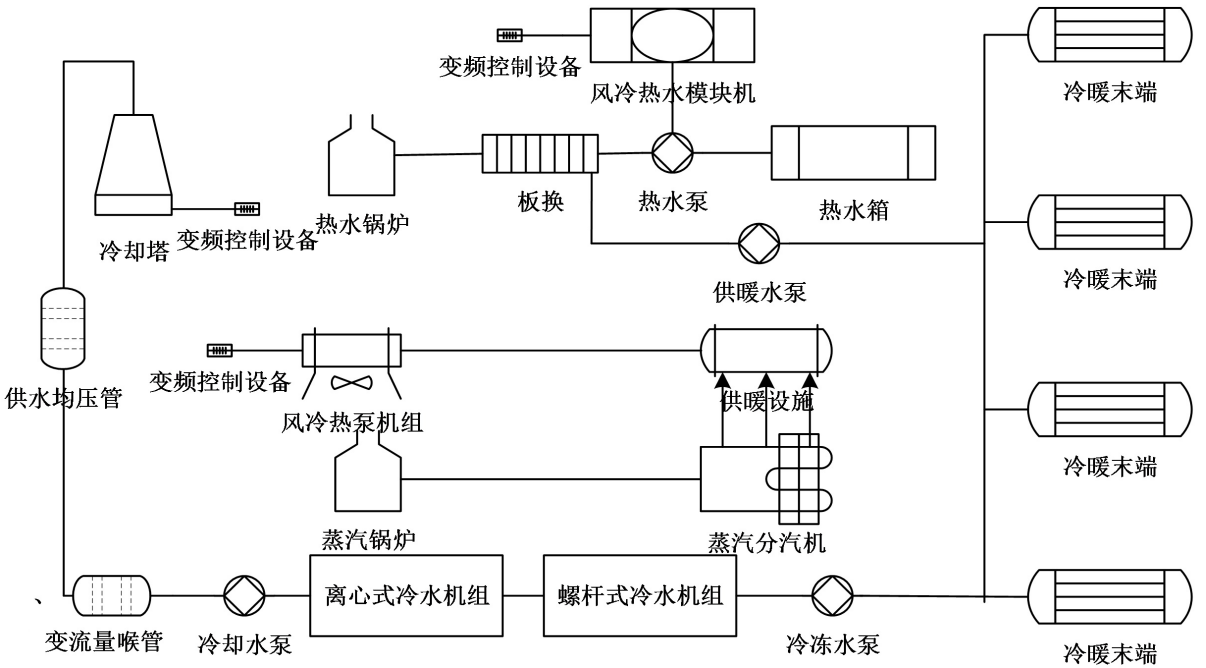


Figure 3. Architecture diagram of the renovated cold and heat source system
图 3. 改造后冷热源系统架构图

5. 能耗与经济分析

5.1. 能耗分析

系统节能能量验证的核心原则是在确保供冷量或供热量恒定的前提下，通过对比改造前后系统的总能耗差异来量化节能成效。具体方法为：基于改造前后设备的额定功率、制冷/制热效率等实测参数，结合运行时间、负荷率等工况数据，采用能耗公式计算理论能耗值(系统能耗 = Σ(设备额定功率 × 运行时间 × 负荷率)/能效系数)，最终通过能耗差值验证节能量。具体节能率采用如下公式计算。

$$e = \frac{Es}{Ebn} \times 100\% \tag{1}$$

e：节能率——节能量与基期能源消耗的比值，表示改造后节省的能耗占原始能耗的比例。

Es: 节能量——通过改造措施后节省的能量量, 通常以千瓦时(kW·h)或其他合适的能源单位表示。
Ebn: 基期能源消耗——在进行改造之前, 系统的原始能源消耗量。
其中公式计算所需要的数据如表 2 所示。

Table 2. Parameters and energy consumption data of Company A’s system equipment before and after renovation
表 2. A 公司系统设备改造前后参数以及能耗数据

时间	系统名称	设备名称	数量	电用量/kW·h	单价/元	额定功率/KW
改造前	制冷系统	离心式水冷主机(600 RT)	2 台	960,000 kW·h	0.7	393
		螺杆式水冷主机(300 RT)	1 台	82,000 kW·h	0.7	205
		冷冻水泵	5 台	299,000 kW·h	0.7	75
		冷却水泵	5 台	200,000 kW·h	0.7	75
		冷却塔	7 座	53,000 kW·h	0.7	7.5
	热水系统	燃气、燃油蒸汽锅炉(4 T)	1 台	130,810 m ³	4.82	/
		热循环水泵	3 台	110,000 kW·h	0.7	22
	采暖系统	燃油锅炉	2 台	396,000 m ³	4.82	
改造后	制冷系统	离心式水冷主机(600 RT)	2 台	900,000 kW·h	0.7	393
		螺杆式水冷主机(300 RT)	1 台	60,000 kW·h	0.7	205
		冷冻水泵	5 台	200,000 kW·h	0.7	75
		冷却水泵	5 台	160,024 kW·h	0.7	75
		冷却塔	7 座	31,784 kW·h	0.7	7.5
		制冷系统的多场耦合调节变频控制设备	1 台	300 kW·h	0.7	10
	热水系统	热循环水泵	3 台	64,480 kW·h	0.7	22
		风冷热泵机组	1 台	479,793 kW·h	0.7	
	采暖系统	风冷热水模块机	4 台	671,260 kW·h	0.7	

5.2. 经济分析

本研究采用国际通用的 IPMVP Option C (整体设施测量)协议进行能耗验证。基准期选取改造前三年 (2020~2022 年)运行数据的平均值, 报告期为 2023 年全年。重点通过气候校正消除外部干扰:

- 1. 气候校正: 基于南宁市历史气象数据, 采用度日数法对能耗进行线性补偿。
- 2. 运行边界: 保持制冷、热水、采暖三大系统设备范围与改造前一致。
- 3. 数据溯源: 所有能耗数据均通过智能计量设备采集。

改造完成后, A 公司对新的能耗系统进行了运行, 公司能耗费用以及经济成本得到明显改善。以 2023 年为例, A 公司的能耗具体数据如图 4 所示。

基准总能耗是指 A 公司在进行节能改造之前, 一定时期内的总能源消耗量。综合能耗是指在节能改造后, A 公司在相同时间段内的实际能源消耗量。综合节能率表示改造后节约的能耗与基准总能耗之比。

$$\text{综合节能率} = \frac{\text{基准总能耗} - \text{综合能耗}}{\text{基准总能耗}} \times 100\%$$

(2)

A 公司进行能源系统改造以后, 在 2023 年的能耗费用情况如图 3。由图 3 可知, 2023 年公司全年的综合能耗费用都低于基准总能耗的费用, 节能率从 14%到 54%不等, 全年基准总耗能费用 476 万元, 而

实际综合能耗费用为全年基准总耗能费用的 70%，综合节能率达到了 30%。这表明，A 公司通过多场协同的综合能源系统节能改造措施，减少了能源消耗，降低了能源成本。

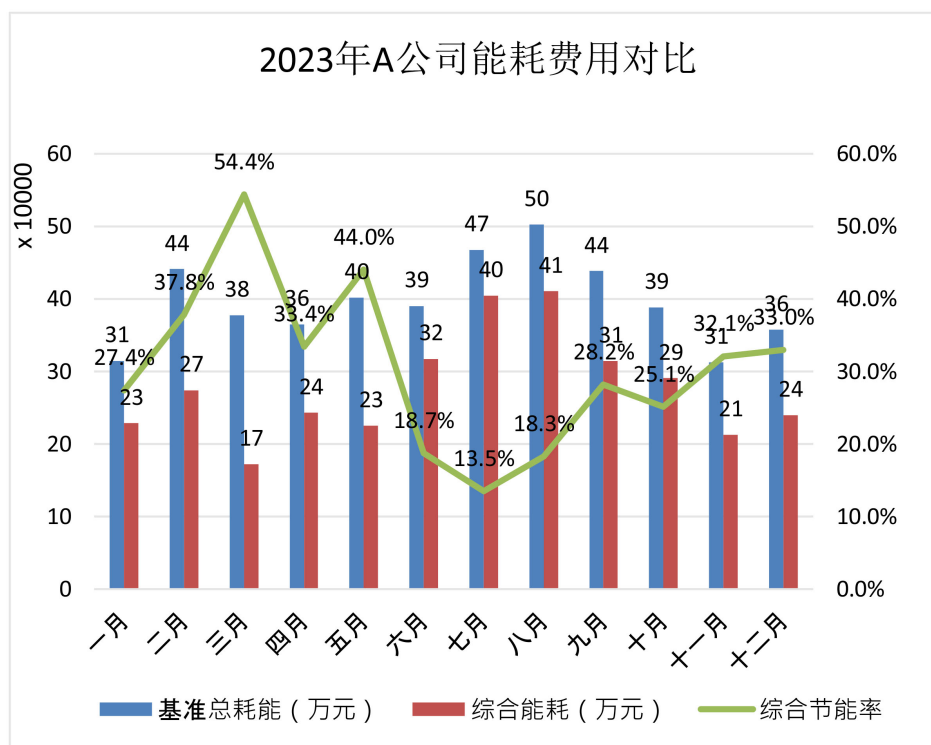


Figure 4. Comparison of energy consumption of Company A
图 4. A 公司能耗对比图

6. 结论

基于多场协同优化理论，A 公司通过构建温度场、压力场和流体场的动态耦合模型，替换或增加高效的能源设备，并结合全面自动化控制技术，实现了对空调系统、热水系统、采暖系统等建筑内各主要能耗单元的设备启停、水温调节以及水流量控制等的精细化管理，从而有效降低了全建筑的能源消耗量，实现了能源高效利用与经济性的双重优化，为建筑节能改造提供了可靠范例。

此次改造过程不影响 A 公司的运营，保证营业效益，改造完成后，自动控制的实际使用效果良好。系统稳定性强，显著减少了管理人力以及运维费用投入。同时，A 公司综合能源系统经改造后完整运行了约 3 年，整体节能率约为 30%，节能效果明显。

本文验证了多场协同的综合能源系统改造在企业节能中的重要作用，特别是多场耦合调节变频技术和智能控制系统实现热力场、电力场与流体场的动态匹配与优化，显著提升了能源利用效率。同时也表明，基于多场协同的系统改造不仅能够在不影响企业正常运营的情况下实现可观的节能减排效果，还通过跨场域的联动优化降低了运营成本，同时履行了企业的社会责任。这一案例的分析为其他企业的节能改造提供了一定参考，展示了综合能源系统优化的潜力和价值，体现了多场协同综合能源系统节能改造的广阔应用前景。

基金项目

中国广西 2023 年度港澳台高层次人才聚桂工作项目 HMT2023005。

参考文献

- [1] 2024-2025 年节能降碳行动方案[J]. 安装, 2024(7): 1-4.
- [2] 武翠芳, 王飞. 产业结构升级对全要素能源效率的影响研究[J]. 山东工商学院学报, 2024, 38(6): 1-10.
- [3] 魏小东. 数据中心空调节能措施的标准化改造[J]. 中国品牌与防伪, 2024(12): 70-71.
- [4] 王佳春. 制冷循环水系统的节能改造及应用[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(6): 126-128, 135.
- [5] Sonnino, G., Evslin, J., Sonnino, A., Steinbrecher, G. and Tirapegui, E. (2016) Symmetry Group and Group Representations Associated with the Thermodynamic Covariance Principle. *Physical Review E*, **94**, Article ID: 042103. <https://doi.org/10.1103/physreve.94.042103>
- [6] 聂云飞, 柯臻玮. 碳减排背景下多场耦合调节变频技术在污水泵站节能降耗中的应用[J]. 市政技术, 2024, 42(12): 61-66, 116.
- [7] 王华权, 叶祥深, 向阳. GH180 变频器在高压水除鳞系统中的应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(22): 54-56.
- [8] 尹盛晖, 施斌, 许礼尉. 通信机楼水冷冷水系统节能优化方案研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2024, 37(S1): 319-323.
- [9] 林晓东. 集中空调水系统水泵合理运用的重要性[J]. 科学技术创新, 2023(16): 45-48.