

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-126-08

北京某大型商场空调系统节能改造方案分析

牛笑晨 褚 赛 刘启明 许抗吾 高 朋

(北京市勘察设计研究院有限公司 北京 100038)

【摘 要】 大型商场人流量大、散热设备多、空调系统运行时间长, 有较大节能潜力。调研了北京某大型商场空调系统的能耗情况, 针对其运行过程存在的问题, 提出了一套基于空调系统节能控制技术的综合节能改造方案。研究表明, 该空调系统节能改造后, 年节电量为 140.56 万 kWh, 每年节省电费 160.24 万元; 节热量为 601.82GJ, 每年节省供热费用 5.95 万元, 节能效果与经济效益较好, 可为北京地区类似公建节能改造提供借鉴和参考。

【关键词】 公共建筑; 空调系统; 节能改造; 冷热源; 控制策略

中图分类号 TU831 文献标志码 A

Energy-saving Transformation of Air Conditioning System in a Large Shopping Mall Located in Beijing

Niu Xiaochen Chu Sai Liu Qiming Xu Kangwu Gao Peng

(Beijing Survey and Design Research Institute Co., Ltd, Beijing, 100038)

【Abstract】 Large shopping malls have large flow of people, more cooling equipment and long operation time of air conditioning system, which has great potential for energy saving. This paper investigated the energy consumption of air conditioning system in a Beijing's large shopping mall. Aiming at the problems existing in its operation process, a comprehensive energy-saving transformation scheme based on the energy-saving control technology of air conditioning system was proposed. The research shows that the annual energy saving of the air conditioning system is 1.41 million kWh, and the annual electricity saving reaches 1.60 million yuan. The heat saving is 601.82 GJ, and the annual heating cost saving reaches 59.5 thousand yuan. The energy saving effect and economic benefit are better than before the renovation, which can provide reference for similar public building energy saving renovation in Beijing area.

【Keywords】 Public buildings; Air conditioning system; Energy-saving transformation; Cold and heat source; Control strategy

0 引言

2020 年全国建筑运行阶段能耗 10.6 亿 tce, 占全国能源消费总量的比重为 21.3%^[1], 单位建筑能耗面积是发达国家的 2~3 倍^[2], 建筑节能已成为节能减排的重点。随着人们对室内环境舒适性和空气品质要求的提高以及进深大、室内发热量大的大体量公共建筑占比的显著增加^[3], 供暖空调系统运行能耗占建筑总运行能耗的 65%以上^[4], 有较大节能潜力。

为了降低大型公共建筑空调系统全寿命周期内的能耗, 田雪冬^[5]提出了节能全过程管理模式,

以期提高空调系统设计、建设及后期运行全过程中的性能, 避免能源浪费。郝志刚^[3]对某大型商业综合体的空调系统进行了优化设计, 同时指出供暖空调系统运行能耗的降低, 需清晰科学地计算项目投入使用后的用冷、用热和用电需求。刘金平^[6]等对某公共建筑的制冷系统增设了冷水机组群控控制、冷冻水和冷却水系统单台水泵变频控制等措施, 使得该系统在全天运行模式下平均节能率达 26.3%, 且冷水机组节能在此次节能改造中处于关键地位。刘元明^[7]认为冷热源设备机房的节能控制是中央

空调系统最核心的部分,为实现医院建筑中央空调系统的高效率能耗管控,探析了冷热源机房节能控制设计与智能化节能运维管理方法,为同类型建筑中央空调系统节能控制研究及工程应用提供理论支撑和技术方法。纪凯^[8]等对我国既有商业类建筑进行了能耗调研,给出了商场建筑、办公建筑和酒店建筑的能耗水平与能耗构成,其中在商场建筑中空调系统的运行能耗占比最高。大型商场因其人流量大,舒适性要求高,空调系统运行时间长等特点,其空调系统单位建筑面积能耗为其他大型建筑的 5 倍^[9]。

针对商场建筑供暖空调系统运行能耗高的问题,本文以北京市某大型商场为例,调研与分析了现场用能情况,依托智慧能源管理控制平台,对其空调冷热源机房与末端系统进行智能化节能升级改造,以实现该商场空调系统的能效提升,达到自动运行、无人值守的运行状态,提高管理效率,并可为北京地区商场及同类建筑的空调系统运行管理提供参考。

1 项目概况

1.1 建筑概况

北京某商场开业于 2007 年,总建筑面积约 62000m²,属于大型商业建筑^[10],该商场地下 2 层、地上 6 层,经营范围以购物、餐饮、娱乐为主;全年营业时间为 10:00~22:00;地理位置优越,娱乐设施齐全,人流量大。

1.2 空调系统概况

1.2.1 冷源

该商场冷源采用 3 台离心式冷水机组,单台机组额定制冷量 7032kW、额定功率 1213kW。循环水泵和冷却塔的配备情况如表 1 所示,其中,中央空调冷冻水系统采用二级泵系统,设备均配备变频器,但并未进行变频调节,目前处于工频运行。

表 1 制冷系统设备一览表

Table 1 List of Refrigeration System Equipment

设备名称	数量/台	额定功率/kW	配备变频器	备注
冷水机组	3	1213	否	—
冷冻一级泵	3	93	是	3 用 1 备
	1	132	是	
冷冻二级泵	4	93	是	3 用 1 备
冷却水泵	4	186	是	3 用 1 备
冷却塔	3	60	是	—

冷站初期设计是为该商场建筑以及塔楼部分的办公建筑供冷,后因物业分割,现冷站只负责商场建筑的冷负荷。所以在实际运行中,整个制冷季仅开启其中一台冷水机组即可满足供冷需求。对于一级冷冻水泵,平时只开 1 台功率为 93kW 的设备即可满足供冷需求,二级水泵也只开启一台功率为 93kW 的设备即可满足供冷需求,如表 2 所示。

表 2 制冷系统设备运行表

Table 2 Operation Table of Refrigeration System

Equipment		
设备名称	运行台数	额定功率/kW
冷水机组	1	1213
冷冻水一级泵	1	93
冷冻水二级泵	1	93
冷却水泵	1	186
冷却塔	1	60

1.2.2 热源

商场热源采用市政热力进行供暖,一次侧热水经过板式换热器与机组进行热交换,制取 55℃ 的热水供给空调系统使用。换热机组共 3 台,配套 3 台换热二次水泵,额定功率为 90kW,运行时由人工控制变频运行。

1.2.3 末端设备

空调末端由全空气 VAV 系统和风机盘管系统组成,其中风机盘管系统主要服务周边走廊区域,冷源为冷站直接提供的冷冻水;VAV 系统主要服务商场 B1~F6 层的商业区,冷站为系统的组合式空调机提供冷冻水,末端采用 VAV box 进行变风量调节。由于篇幅原因不将末端设备的参数详尽列出,经统计末端设备的运行功率总计为 884.1kW。目前因自控系统问题,所有 VAV box 及组合式空调机组均无法进行调控,仅能进行启停控制,开启时末端设备均以工频运行。

1.3 空调系统能耗现状

根据商场冷站设备运行记录,2020 年~2022 年,冷源设备累计开启小时数分别为 1724h、1728h 和 1606h,制冷季年平均开启小时数为 1686h,末端设备与其开启时间一致。由于热源采用的是市政热力,故供暖时间为 11 月 15 日~3 月 15 日,在营业时间 10:00~22:00 内均保证室内良好的热环境,则末端设备冬季累计供暖小时数为 1452h。

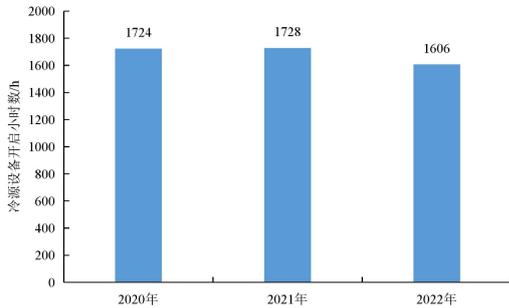


图 1 冷站设备开启小时数

Fig.1 Opening hours of central refrigeration plant

1.3.1 冷站能耗统计

冷站耗能设备为冷水机组、冷却水泵、冷冻水泵与冷却塔，冷站的水泵与冷却塔均为定频运行，其耗电量可由式（1）计算。

$$E_i = \left(\sum T_i \right) N_i \quad (1)$$

式中： $\sum T_i$ 为设备在制冷季运行时间，h； N_i 为设备的输入功率，kW； E_i 为设备制冷季耗电量，kWh。

主机耗电量计算如公式（2）所示：

$$E_c = \sum P_c \cdot \alpha_j \quad (2)$$

式中： E_c 为设备制冷季耗电量，kWh； P_c 为冷水机组额定功率，kW； α_j 为不同时刻冷水机组运行电流百分比，%。

根据 1.2 节知，整个制冷季仅开启其中一台冷水机组，一级冷冻水泵只开 1 台功率为 93kW 的设备，二级水泵也只开启一台功率为 93kW 的设备即可满足供冷需求。根据设备运行时长以及表 1 的设备参数，计算得到冷站用电情况如表 3 所示。2020 年~2022 年冷站总计用电量分别为 192.74 万 kWh、213.27 万 kWh 和 199.03 万 kWh，年均用电量约为 201.68 万 kWh。

表 3 冷站用电情况统计表

Table 3 Statistics of electricity consumption in central refrigeration plant

用电设备		2022 年	2021 年	2020 年
冷水机组	万 kWh	117.95	132.83	118.58
冷冻水一级泵	万 kWh	14.93	16.07	16.03
冷冻水二级泵	万 kWh	14.94	16.07	16.03
冷却水泵	万 kWh	29.87	32.14	32.07
冷却塔	万 kWh	15.05	16.16	16.31
总计	万 kWh	192.74	213.27	199.03

图 2 显示了冷站分项用电情况，其中制冷主机能耗约占空调系统能耗的 61%，是空调系统节能改造的重点；冷却水泵和冷冻水泵能耗占空调系统能耗的 15%和 16%，冷却塔能耗占 8%。

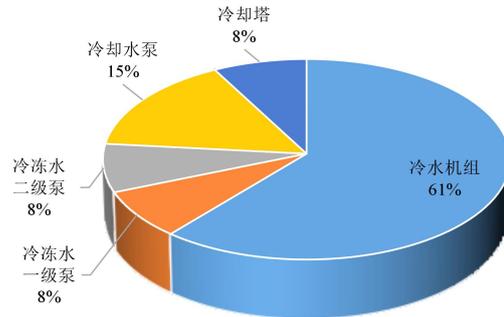


图 2 冷站分项用电情况

Fig.2 Sub-item power consumption of central refrigeration plant

1.3.2 热站能耗统计

依据业主提供的市政用热数据，项目年均用热量约为 12036.43GJ，各年用热数据如表 4 所示。

表 4 热站用热情况统计表

Table 4 Statistical Table of Heat Consumption in Thermal Station

年份	2017	2018	2019	2020	2021	2022
用热量/GJ	8544	13781	11538	13748	12850	8050

1.3.3 末端能耗统计

末端设备均为定频运行，且全空气系统 box 箱风阀均全部开到最大，其耗电量可由式（3）计算。

$$E_i = \left(\sum T_i \right) N_i \quad (3)$$

式中： $\sum T_i$ 为末端设备运行时间，h； N_i 为设备的输入功率，kW； E_i 为末端设备耗电量，kWh。

末端开启时间与冷水机组一致，2020 年~2022 年制冷季末端空调用电量分变为 152.42 万 kWh、152.77 万 kWh 以及 141.99 万 kWh，年均用电量约为 149.06 万 kWh。

冬季供暖时间为 11 月 15 日~3 月 15 日，共计 121 天，每天平均开启时间约为 12 小时，冬季平均供暖小时数约为 1452h。经计算，商场供暖季末端组空总计用电量约为 128.36 万 kWh。

2 节能诊断分析

2.1 冷站节能诊断

图 3 为 2020 年~2022 年的冷水机组运行电流

百分比分布情况, 可以看出机组运行电流百分比 RLA% 在 50%~90% 之间波动, 其中 RLA% 在 60%~70% 的小时数最多, 其次为 50%~60% 区间, 约 60% 的时间机组运行: RLA% 在 50%~70%, 机组低部分负荷运行时间较长。

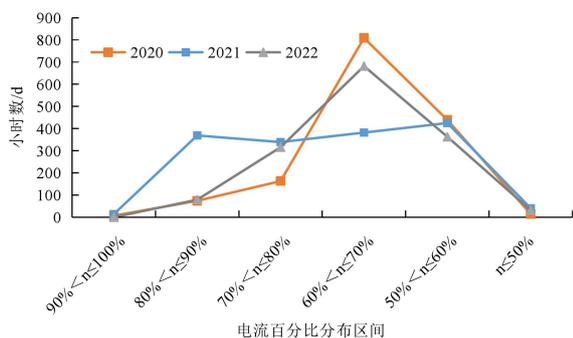


图 3 冷水机组电流百分比分布情况

Fig.3 Current percentage distribution of chillers

据现场调研分析, 冷站系统的问题主要有:

(1) 冷水机组目前无群控优化, 单台冷机制冷量较大, 长期处于部分负荷状态;

(2) 冷水机组冷冻水回水及冷却水回水的电动阀门目前均已损坏, 且处于常开状态;

(3) 冷却塔运行状况良好, 但尚未进行变频控制, 在部分负荷时能耗高;

(4) 冷冻水供水温度采用手动方式设定, 一定程度上也影响了冷机能效;

(5) 冷站缺少温度、压力、流量、能耗、能效等参数的监测, 不能及时反映系统的运行工况、运行效率、机组状况等, 运维管理工作效率低。

2.2 热站节能诊断

根据现场调研分析, 热站系统的主要问题有:

(1) 换热机组的运行完全由人工操作, 频繁进行巡查并校核用能状态, 无法做到热站的自动运行和无人值守;

(2) 热站系统的电动阀门及水泵变频器均通过本地控制柜控制, 无远程控制;

(3) 热站未设气候补偿器, 仅凭人工经验进行系统质调节, 不仅精准度较差, 且会产生一定延迟。

2.3 末端节能诊断

目前空调末端所有 VAV box 及组合式空调机组均无法进行调控, 仅能进行启停控制, 且开启时

两者均以工频运行, 无法根据冷热需求进行温度调节。

空调末端每年运行时间较长, 约占全年时间的 2/3 以上, 全年耗电量约为 277 万 kWh, 故目前急需恢复空调末端系统的控制功能, 在保证正常冷、热供应的基础上对末端系统进行智控调节, 有效减少空调末端系统的能耗。

3 节能改造方案

针对该商场空调系统运行过程中存在的问题, 采用多种节能技术对空调系统冷热源及末端设备进行改造, 建立自动控制系统实现空调系统的科学管理。

3.1 冷站节能改造

增设冷站自动控制系统, 对制冷系统进行智能化节能升级改造, 并配合对应的下位机智能控制柜, 从而实现对冷源主要设备的变频控制、连锁控制、节能控制; 按需供冷, 保障最佳输出工况和最节能运行。主要改造内容如下:

(1) 增设节能控制系统所需温度、压力传感器、冷量表等;

(2) 增设 1 台冷站智能控制柜;

(3) 增设冷冻水泵节能控制柜;

(4) 增设冷却水泵节能控制柜;

(5) 修复/更换故障电动阀, 接入智能控制柜;

(6) 冷水机组变频改造。

3.1.1 冷站节能控制策略

要实现中央空调系统的最佳运行和节能, 必须针对空调系统的各个环节统一考虑, 全面控制, 使整个系统协同运行, 才能实现最佳综合节能。

(1) 冷冻水出水温度优化

实时监测室内外温湿度等参数, 根据空调区域的负荷情况, 调节优化冷水机组的冷冻水出水温度。部分负荷时, 尽量提高供水温度, 通过重设该温度值, 在保证末端的供冷效果的同时有效提高机组能效。

冷冻水出水温度的确定, 应该根据空气处理设备的处理能力, 同时考虑室外气象条件和空调负荷变化等因素的影响。由于室外气象变化复杂, 很难给定一个准确的变水温运行方案, 基于该商场的运行特性, 给出了冷冻水推荐设定温度表进行参考。

表 5 出水温度推荐表

Table5 Recommended Table of Chilled Water Temperature

月份	时间段	冷冻供水温 度°C	冷冻供回温 差°C
5/9 月	8:00-9:00	11.5	6
	9:00-11:00	10.5	6
	11:00-13:00	9.5	6
	13:00-17:00	9	6
	17:00-21:00	9.5	6
	21:00-22:00	10.5	6
6/7/8 月	6:00-9:00	9	6
	9:00-11:00	8	6
	11:00-13:00	7	6
	13:00-17:00	6	6
	17:00-21:00	8	6
	21:00-22:00	9	6

(2) 冷冻水系统节能联控

温差控制适用于用户端不设调节阀,且用户负荷同步变化的情形,即适合于商场、展览馆等以全空气系统为主的空调系统^[11]。当检测的供回水温差小于自控系统的设定温差时,降低冷冻水泵频率,即可减少冷冻水流量,从而减少多余的冷量传送;反之,则提高冷冻水泵频率,增大冷冻水流量,保证末端的冷量需要。

在一次泵变流量控制系统中,当系统流量减少时,控制系统要严格监控系统流量的变化,以防一次水进水流量无法维持机组的正常运行而导致离心机组的不正常停机,一旦系统流量不足时,系统旁通阀应立即开启,补充水量以满足系统最低水流量的需求。一次泵的要求是最小频率需要满足冷水机组的最低冷冻水流量需求,此冷冻水流量对应的水泵频率值就是一次泵组的最小频率。为保证冷水机组的正常运行,设定冷水的流量变化范围在 80%~100%之间^[12]。

(3) 冷却水系统节能联控

根据系统预测的实时负荷,对冷水机组、冷却泵、冷却塔的综合能效进行模拟,从而实现冷却泵、冷却塔运行频率的自动寻优。满足系统散热量的同时,保证冷却侧(冷水机组+冷却塔+冷却泵)的综合能效最高。

采用最低冷却塔供水温度来控制冷却塔风机

变频,达到节能的目的。群控系统根据室外温湿度计算湿球温度 T_{wet} , 而通过冷却塔通风换热冷却水供水温度可以达到 $T_{wet} + \Delta t^{\circ}\text{C}$ (通常取 3°C 的温差为参考值)^[13], 故以 $T_{wet} + \Delta t^{\circ}\text{C}$ 作为冷却水温度的控制设定值,尽量使冷却水供水温度达到或接近该设定值,系统同时对冷水机组的冷却水进水温度进行监视,冷却水进水温度范围为 $20^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 。通过调节冷却水泵的频率来调节冷却水流量,维持冷却水进回的温差不变 (5°C), 以实现冷却水泵的节能运行,为保证制冷主机的正常运行,设定冷却水的流量变化范围在 80%~100%之间^[12]。

(4) 设备启停控制

冷水机组的启停是由控制系统根据预先编程来进行的。商场可根据工作日、节假日、促销日等不同运营模式按需求设定冷机设备的开关机时间,从而减少不必要的浪费。设备的连锁控制如下:

启动:首先开冷却塔风机→开冷却水蝶阀→开冷却水泵→开冷冻水蝶阀→开冷冻水泵→最后开冷水机组;

停止:首先停止冷水机组(延时 10 分钟)→关冷冻水泵→关冷冻水蝶阀→关冷却水泵→关冷却水蝶阀→最后关冷却塔风机→关冷却塔蝶阀。

系统将自动记录单台冷水机组的累计运行时间,根据机组的累计运行状况来采取超前和滞后控制,尽量使冷水机组达到平均使用,便于用户进行统一的维护和保养。

3.1.2 冷水机组变频改造

冷水机组在不同负荷情况下能效不同,根据 AHRI (美国制冷协会 (ARI) 与美国燃器具制造商协会) 规定的评估冷水机组耗电指标的标准 (AHRI 550/590(I-P)-2018), 可用 NPLV (非 ARI 标准工况下综合部分负荷效率) 来衡量冷水机组的综合能效,可作为冷水机组实际运行能耗的评价指标,其计算如式 (4) 所示。

$$NPLV = \left(\frac{0.01}{A} + \frac{0.55}{B} + \frac{0.41}{C} + \frac{0.04}{D} \right)^{-1} \quad (4)$$

式中: A 为 100%同冷水机组负荷下的冷水机组能效; B 为 75%同冷水机组负荷下的冷水机组能效; C 为 50%同冷水机组负荷下的冷水机组能效; D 为 25%同冷水机组负荷下的冷水机组能效。

为提高冷水机组 NPLV 值,使用原厂设备对单台冷水机组进行变频改造。变频离心式冷水机组的

控制将导流叶片调节与变频控制有机结合起来, 其控制逻辑为: 70%~100%负荷范围内, 机组保持导流叶片全开, 通过变频控制装置降低压缩机电动机转速来使机组卸载; 当负荷低于 70%时, 导流叶片开始关闭; 当负荷低于 50%时, 为避免出现喘振适当增加压缩机转速。这样可加大机组运行范围^[14], 与定频机组相比较, 冷水机组在制冷量相同下, 变频压缩机相关效率更高, 能耗更低。

3.2 热站节能改造

目前热站的换热循环泵虽设有控制柜, 但实际仍凭人工经验手动调节设备的运行。针对此问题, 本次改造对控制柜重新编程并增设节能控制逻辑, 从而实现换热站的节能运行, 主要功能包括:

(1) 分时节能控制: 在非运营时间段, 根据室内温度调节换热循环泵的频率, 主动减少供热量, 避免热量浪费, 实现热站的节能运行;

(2) 气候补偿控制: 增设室外气象参数传感器, 当室外温度变化时, 为保证室内温度的相对稳定, 可对换热循环泵频率进行调节, 进而实现供水温度的动态调整。依据天气条件按需供热, 避免在供暖初期和末期的过度供热。

3.3 末端节能改造

3.3.1 末端控制系统优化

控制空调机组区域供能调节, 将原有的末端组合式空调机组接入智慧能源管理平台, 恢复其调控功能。通过在商场典型区域设置的温湿度传感器所反馈的室内环境温度情况, 动态调节各空调机组的冷水流量和风机频率, 控制空调机组的送风温度和送风量, 保证各区域温度稳定在设定值范围内。管理人员可根据需求主动调整不同区域的送风温度及风量, 降低空调系统的运行能耗, 同时有效改善商场内冷热不均的状况。

3.3.2 新风控制系统优化

通过回风管 CO₂ 浓度传感器反馈的参数, 动态调节新风量, 在保证室内空气质量的前提下降低冷负荷。

由室外温湿度传感器实时反馈的室外空气温湿度情况确定的新风焓值, 调整新风系统运行工况。当室外空气的比焓低于商场内设计状态点的比焓时, 自动开启新风机和新风阀, 加大新风量或全新风运行, 充分利用新风的自然冷却能力对商场进行降温, 减少空调能耗。

3.4 智慧能源管理平台

在上述改造方案的基础上, 综合考虑该商场业主的实际管理需求, 建立一套能对商场内各种能源设备的运行状态、能耗等进行实时监测、控制以及智能化管理的平台系统。它是以互联网技术、信息技术、大数据分析等技术为依托, 以“集中管理、分散控制”为原则而建立的综合智慧能源管理平台, 由节能控制柜、水泵控制柜、传感器、执行器和上位机精准计量及节能控制软件等组成, 其框架如图 4 所示。

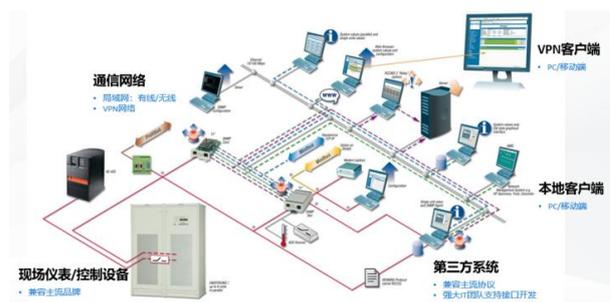


图 4 智慧能源管理平台

Fig.4 Smart Energy Management Platform

该智慧能源管理平台除了能实现空调系统的节能运行外, 还具以下功能, 主要包括:

(1) 检测功能: 实时监测并显示室外气象参数、能源站整体能效值、能效标尺、供冷/供热量、耗电/气量、机组能效值以及能源站热平衡率等参数;

(2) 三维显示: 能源站设备布置图及水路布置图, 并标明每台设备及管路的详细参数与信息;

(3) 热平衡校验: 实时检测系统的热平衡, 验证测量数据的有效性;

(4) 报警功能: 记录并管理主要设备的报警时间和解除时间及报警次数等, 且在画面上显示相应报警点;

(5) 能源管理: 实时统计主要设备的用能量、供冷/供热量等, 并自动计算标煤、碳排放量; 自动计算能源站能耗指标、能效指标, 并通多种算法帮助管理者准确定位能源站用能问题;

(6) 能效诊断: 提供“由指标到问题”的能源站能效诊断功能, 将定位问题, 并给相应解决方法;

(7) 报表功能: 支持逐日、逐周、逐月、逐年和自定义的自由查询空调系统运行日志、制冷主

机、冷源能效比等数据。

4 节能改造评估

基于第 3 节的节能改造方案, 本节计算分析了该商场经节能改造后空调系统的耗电量与运行费用。

4.1 节能量评估

4.1.1 冷站节能评估

(1) 水泵与冷却塔变频调节

在水泵的变频调速应用中, 对于同一台水泵以不同转数运行时, 流体密度与结构尺寸均为一致, 则水泵的流量、扬程、轴功率与转数的关系如下^[15]:

$$\frac{Q_s}{Q_e} = \frac{n_s}{n_e}; \frac{H_s}{H_e} = \left(\frac{n_s}{n_e}\right)^2; \frac{N_s}{N_e} = \left(\frac{n_s}{n_e}\right)^3 \quad (5)$$

式中: 下角标 e 是对额定工况而言; 下角标 s 为实际工况而言; H 为水泵的扬程, m ; Q 为泵与风机的流量, m^3/s ; N 为泵与风机的功率, kW ; n 为转数, r/min 。

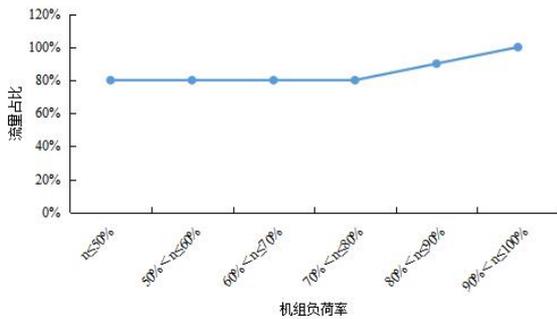


图 5 流量分配

Fig.5 Flow Distribution

依据 $Q=cm\Delta t$, 在供回水温差不变的情况下, 负荷率与流量 1 次方关系。为保证冷水机组的正常运行, 设定冷冻水和冷却水的流量变化范围在 80%~100%之间, 则水泵的流量和负荷率的关系如图 5 所示。依据 2.1 节中冷水机组负荷率分布情况, 对水泵频率进行了加权平均, 求得水泵的平均频率为 40.3Hz。传统的空调系统水泵频率变化下限约在 37~42Hz, 极少数达到 35Hz, 有的空调系统在水泵频率低于 45Hz 时就由于压差保护而停机^[16]。依据工程经验, 基于前述节能控制改造措施进行改造后, 在方案阶段采用保守估算, 冷冻水泵、冷却水泵降频运行, 平均频率降至 45Hz, 水泵的转速与输入频率为 1 次方关系, 其输入功率计算如式 (6)

所示, 输入功率降低为原来的 0.729, 若运行时间一致, 则水泵的运行能耗可降低约 27.1%; 冷却塔降频运行后平均频率同样可降至 45Hz, 能耗可降低约 27.1%, 具体节能量如表 6 所示。

$$N_s = \left(\frac{f_s}{f_e}\right)^3 N_e = \left(\frac{45}{50}\right)^3 N_e = 0.729 N_e \quad (6)$$

式中: f 为水泵的输入频率, Hz 。

(2) 冷站节能控制措施

依据文献[17-19]和工程经验, 基于前述节能控制改造措施进行改造后, 冷水机组运行能耗可降低约 5%, 每年可节约 6.16 万 kWh。

(3) 机组变频调节

根据冷水机组变频改造的测算, 改造后 $NPLV$ 值由 0.506 减小至 0.375, 根据冷站运行记录计算, 冷水机组年平均耗电量为 123.12 万 kWh, 预计节能改造后年用电量为 91.35 万 kWh, 每年可节能 31.77 万 kWh, 节能率为 25.8%。

4.1.2 热站节能量评估

本次改造换热站部分重点为提升换热站智能化水平, 改造后自控系统将内置节能运行策略, 实现远程监控、自动运行、无人值守的运行效果, 提升能源的管理效率。在能源使用方面, 智慧能源管理平台可提升原有运行策略的控制精度及调控频率, 进一步减少运行能耗, 依据文献[20]和工程经验预计可实现供热量节能约 5%。目前该商场平均每年用热 12036.43GJ, 预计节能改造后每年可节省热量 601.82GJ。

4.1.3 末端节能量评估

本次对中央空调末端的改造首要目标为恢复其自控系统调节功能, 在此基础上通过智慧能源管理平台动态调节空调机组的运行工况以实现节能。

根据 1.3.3 节末端能耗统计知, 夏季用电量约为 149.06 万 kWh, 冬季用电量约为 128.37 万 kWh。那恺^[21]指出, 当空调系统中的风机降频工作时, 由于风压变化幅度不大, 变频器的工作频率通常大于 40Hz。依据工程经验, 经过前述改造措施改造后, 空调机组平均运行频率预计为 45Hz, 风机节能量约为运行能耗的 27.1%; 同时采用整体节能策略, 实现末端与冷源的联合调控, 大约可实现冷机节能量 5%。通过对末端系统的节能改造, 预计总节能量约为 81.34 万 kWh, 节能率为 29.32%。

综上所述, 通过对冷站、热站及末端系统增设

节能控策略并接入智慧能源管理平台, 实现了商场空调系统的无人值守和节能运行。节能改造后, 每年可节省电量 140.56 万 kWh, 节省热量 601.82GJ。

表 6 分项节能量计算表

Table 6 Calculation Table of Sub-item Energy Saving

措施	改造后耗电量 /万 kWh	节能率	节能量 /万 kWh
冷机控制	116.97	5.00%	6.16
一级泵变频	11.43	27.10%	4.25
二级泵变频	11.43	27.10%	4.25
冷却泵变频	22.86	27.10%	8.50
冷却塔变频	11.55	27.10%	4.29
合计	174.23	13.61%	27.45
主机变频	91.35	25.80%	31.77
末端	202.25	27.10%	75.18
末端控制 机组	116.97	5.00%	6.16
合计	319.21	29.32%	81.34
热站控制/GJ	11434.61	5.00%	601.82

4.2 经济性分析

依据业主提供的《水电费清单》, 项目平均电费约为 1.14 元/kWh, 热价为 98.9 元/GJ, 项目各项节能技改措施节省的运行费用如表 6 所示。由表 7 可知, 冷站改造年均节费 31.29 万元, 热站改造年均节费 5.95 万元, 末端改造年均节费 92.73 万元, 主机变频年均节费 36.22 万元; 综上所述, 项目年均总节费 166.19 万元。

表 7 效益分析计算表

Table 7 Benefit Analysis and Calculation Table

措施	能源类型	单价 /元	年均节费 /万元
冷机控制	电力		7.02
一级泵变频	电力		4.85
二级泵变频	电力	1.14	4.85
冷却泵变频	电力		9.69
冷却塔变频	电力		4.89
合计	电力		31.29
主机变频	电力	1.14	36.22
末端	电力		85.71
末端控制 机组	电力	1.14	7.02
合计	电力		92.73
热站控制 (GJ)	热力	98.9	5.95

5 结语

本文针对北京某商场供暖空调系统运行能耗高、管理控制水平不佳等问题, 对其进行了冷站、热站及末端系统的节能改造。同时, 依托智慧能源管理平台, 实现了商场供暖空调系统的优化运行, 不仅保证了商场供冷(热)区域环境舒适性, 而且大幅降低了供暖空调系统的运行能耗, 完善了用能的精细化管理, 提高了能源利用率, 降低了能耗成本。通过计算可知, 节能改造后年节电量为 140.56 万 kWh, 每年节省电费 160.24 万元; 节热量为 601.82GJ, 每年节省供热费用 5.95 万元, 具有较好的节能效果及经济效益, 可为北京地区类似公建节能改造提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会. 2022 年中国建筑能耗与碳排放研究报告[R]. 北京: 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会, 2022: 10.
- [2] 牛东杨. 唐山市商场类建筑能耗统计与节能改造分析[D]. 河北工业大学, 2015: 2.
- [3] 郝志刚, 魏庆芑, 邓杰文, 等. 公共建筑空调系统全过程管理方法研究(4): 基于能源管理平台的系统运营调适[J]. 暖通空调, 2019, 49(4): 77-83.
- [4] 住房和城乡建设部科技发展促进中心. 中国建筑节能发展报告(2014 年)——既有建筑节能改造[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 2-3.
- [5] 田雪冬. 公共建筑全过程能耗总量控制管理方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2015: 14-92.
- [6] 刘金平, 刘磊, 刘雪峰, 等. 办公建筑空调制冷系统节能改造分析[J]. 建筑科学, 2012, 28(2): 23-28.
- [7] 刘元明, 刘欢, 李冬. 智慧医院中央空调系统节能控制与运维管理[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(7): 117-122.
- [8] 纪凯, 赵树兴. 既有商业建筑能耗现状分析及节能对策[J]. 建筑节能, 2012, 40(9): 64-66.
- [9] 杨福, 王衍金, 王伟宵. 基于 eQUEST 的某商业建筑空调系统节能分析[J]. 建筑节能, 2020, 48(5): 76-79.
- [10] 王洪强. 可持续发展与节能建筑[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 86-87.
- [11] 李苏泷. 一次泵系统冷水变流量节能控制研究[J]. 暖通空调, 2006, (7): 72-75.
- [12] 闫军威, 冯家亮. 广州某大型商场空调系统节能改造[J]. 暖通空调, 2014, 44(5): 87-91.

(下转第 154 页)

研究重点,需要跟着科技进步的步伐,不断提升治理水平,为行业发展提供更加绿色环保的洁净室环境,为我国半导体行业发展奠定基础。

参考文献:

- [1] 马良. 半导体加工工艺和半导体制程设备[J]. 科技风, 2016, (16): 228.
- [2] 职远, 张丁超, 刘俊杰等. 半导体晶圆厂洁净室气态化学污染物测试及污染源分析[J]. 暖通空调, 2021, 51(3): 46-50.
- [3] 刘珂. 石油化工中心化验室通风空调系统设计[J]. 暖通空调, 2020, (9): 91-96.
- [4] 曾丽玲, 陈清良, 鍾美瑛. 无尘室内部发生之气态分子污染 (amc) 异常处理措施[J]. Dubai Medical Journal, 2007, (44): 64-70.
- [5] 职远, 张丁超, 刘俊杰, 等. 半导体晶圆厂洁净室气态化学污染物测试及污染源分析[J]. 暖通空调, 2021, 51(3): 46-50.
- [6] 杨勇, 吴宁徽. 半导体厂房气态分子污染物控制探讨[J]. 暖通空调, 2023, 53(9): 133-140.
- [7] 裴晶晶, 薛人玮, 刘俊杰. 气态分子污染及控制技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2020.
- [8] ISA. 过程测量和控制装置的环境条件: 腐蚀性气体[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [9] 黄秀琴, 李亚东. 洁净室化学过滤器的选型及使用效果研究[J]. 科学技术创新, 2020, (14): 51-52.
- [10] 周金锋. 半导体洁净室内分子级污染物的控制方法[J]. 半导体技术, 2008, 33(6), 3.
- [11] 张艳群, 李铭忠, 周广健. 环境工程中有有机废气处理技术实践探析[J]. 清洗世界, 2023, 39(8): 13-15.
- [12] 张青. 中央空调系统节能运行控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 70.
- [13] 贾晶, 严新娟. 对变频离心式冷水机组全年节电的探讨[J]. 暖通空调, 2009, 39(1): 66-69.
- [14] 付祥钊, 肖益民. 流体输配管网 (第 3 版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 186-187.
- [15] 李彬, 肖勇全, 李德英, 等. 变流量空调水系统的节能探讨[J]. 暖通空调, 2006, (1): 132-136.
- [16] 晋欣桥, 李晓锋, 惠广海, 等. 中央空调水系统控制的优化分析[J]. 系统仿真学报, 2003, (8): 1113-1115.
- [17] 刘金平, 周登锦. 空调系统变冷水温度调节的节能分析[J]. 暖通空调, 2004, (5): 90-91, 96.
- [18] 封小梅, 简弃非, 左政. 冷却水系统变流量的全年工况节能分析[J]. 建筑科学, 2010, 26(4): 80-84.
- [19] 张红. 北京某高校锅炉房节能控制系统的应用[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 900-904.
- [20] 那恺. 浅谈空气处理机组风机变频控制的相关问题[J]. 制冷与空调, 2011, 11(4): 29-31.

(上接第 133 页)