

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-876-07

医院集中式空调系统节能降耗实现路径探讨

严润刚¹ 王旻馨¹ 谢征兵¹ 贾炯²

(1. 重庆医科大学附属第一医院 重庆 400016;

2. 开利空调销售服务(上海)有限公司 上海 200001)

【摘要】 通过对医院新建大楼集中式空调系统之高效机房设计进行探讨, 提出全年平均能效比(EER)不小于6.0的1级能效等级设计指标, 并简要阐述了实现的路径; 而在医院既有集中式空调系统运维上, 通过采取“智能化、制度化、专业化、精细化”等节能管理举措, 使得在医疗业务量大幅增长的情况下, 仍旧实现大楼建筑耗电量同比下降约2.66%, 每小时用电负荷约减小53kW。通过对医院既有集中式空调系统中能耗占比最高的空调主机进行变频改造仿真计算, 发现变频改造后的空调主机能效有望实现较大提升, 并实现年节约99545.4度电, 节能率约为19.44%, 减少二氧化碳排放量约56.77吨。

【关键词】 医院; 中央空调系统; 节能降耗; 路径

中图分类号 TK01+8/TU201.5/TU83/TB6 文献标志码 A

Exploration of Implementation Path for the Energy Conservation and Consumption Reduction in the Hospital's Centralized Air Conditioning System

Yan Rungang¹ Wang Minxing¹ Xie Zhenbing¹ Jia Jiong²

(1. The First Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing, 400016;

2. Carrier Air Conditioning Sales & Service (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai, 200001)

【Abstract】 By exploring the efficient machinery-room design of the centralized air conditioning system in a newly built hospital building, the level 1 energy efficiency design indicator with an annual average energy efficiency ratio (EER) of no less than 6.0 is proposed. The path of achieving the efficient machinery-room is explained briefly. By adopting energy-saving management measures such as intelligence, institutionalization, specialization, and refinement, the operation and maintenance management are being performed in the existing centralized air conditioning system of the hospital. The building's electricity consumption has decreased by 2.66% year-on-year, and the hourly electricity load has decreased by 53kW, despite a significant increase in medical business volume. Finally, by simulation calculations on the frequency conversion transformation of central air conditioning unit, which is the highest proportion of energy consumption in the existing centralized air conditioning system of the hospital, it is found that the energy efficiency of the air conditioning unit after frequency conversion transformation is expected to be significantly improved, and an annual energy saving of 99545.4kWh will be achieved, with an energy saving rate of about 19.44% and a reduction of about 56.77tons of carbon dioxide emissions.

【Keywords】 Hospital; Central air conditioning system; Save energy and decrease consumption; Path

作者简介: 严润刚(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事于动力工程及工程热物理领域的研究, E-mail: yanxy512@126.com

通讯作者: 王旻馨(1972-), 女, 本科, 高级工程师, E-mail: 913528459@qq.com

收稿日期: 2024-02-29

0 引言

公共建筑总能耗普遍较高,约占建筑总能耗的38%^[1],医疗建筑能耗是一般公共建筑的1.6~2倍^[2,3]。医疗建筑因其人流量大、建筑层高大、净化要求高等特点,其集中式空调系统能耗约占医院运行总能耗的40%~60%^[4-8]。因此,对医院集中式空调系统的节能研究、探讨便显得尤为重要。

在节能改造方面,李成浩^[5]对医院冷冻机房中央空调主机、冷却水泵、冷冻水泵等设备及控制进行了节能改造。无独有偶,陶根泉^[9]也通过将原集中式空调系统中设计裕度偏大的冷却水泵和冷冻水泵进行更换,实现节能降耗。而刘畅与罗运有^[10]则通过对集中式空调系统中的水泵、冷却塔,以及末端盘管风机等进行优化改造实现节能。

在节能管理方面,胡辉^[3]指出做好节能管控工作,可减少空调系统运行过程中的能耗。刘元明等^[8]提出对集中式空调系统进行精细化管控,以彻底解决高能耗设备资源浪费问题。陈辉^[11]则通过建立完善的能源控制、管理和运维一体化平台,以达到实时监控和调整空调系统运行状态,确保其处于最佳运行状态,进而实现节能的目的。

在节能设计方面,业界不乏有对高效制冷机房的研究报道,张有华^[12]对高效制冷机房的技术进行了分析和探讨;李元阳等^[13]基于高效机房在科技园的应用对其设计、设备选型等进行了介绍。而针对医疗建筑集中式空调系统节能设计方面,已见有刘元明等^[7]利用智慧化手段对医院集中式空调系统搭建了节能控制系统,以实现高效运行。林伟^[14]通过对医院集中式空调系统设计上优化,实现大楼空调系统的节能运行。

前述文献多就节能改造、节能管理、节能设计等某一方面进行报道,少有针对医院新建集中式空调系统设计和既有集中式空调系统运维管理与节能化改造作系统性阐述。而即使是对新建集中式空调系统设计方面,也鲜有关于医院高效机房设计与实现路径方面的报道。

本文将首先以医院新建大楼集中式空调系统全年综合能效比(*EER*)设计指标为切入点,阐述医院高效机房设计与实现的路径;其次,介绍在既有建筑集中式空调系统运维管理方面采取的举措,以及达到的节能效果;最后,对既有建筑集中式空调系统中能耗占比最高的空调主机节能改造方案

进行分析,进而对医院新建与既有集中式空调系统节能降耗实现路径进行系统性的探讨。

1 医院新建大楼集中式空调系统节能设计

1.1 新大楼高效机房能效目标

在美国ASHRAE暖通空调应用手册^[15]中依据制冷机房全年平均能效比(*EER*)进行了等级划分,*EER*≥5.0的为高效机房,而*EER*≤3.5的制冷机房则需改造。而我国在T/CECS 1012-2022《高效制冷机房技术规程》中,又将高效机房能效等级划分为3级(见表1)。

表1 高效机房能效等级

Table 1 Energy efficiency grade of the efficient machinery-room

能效等级	1级	2级	3级
<i>EER</i> (W/W)	6.0	5.5	5.0

制冷机房全年平均能效比(*EER*)为空调冷水机组全年制冷量与制冷机房各设备全年耗电量的比值,即:

$$EER = \frac{Q_{L\text{总}}}{W_{\text{总}}} = \frac{\sum Q_L}{\sum W_L + \sum W_T + \sum W_Q + \sum W_D + \sum W} \quad (1)$$

式中: $Q_{L\text{总}}$ 为空调冷水机组的全年制冷量,kWh; $W_{\text{总}}$ 为制冷机房各设备的全年耗电量,kWh; Q_L 为空调冷水机组的制冷量,kWh; W_L 为空调冷水机组的耗电量,kWh; W_T 为冷却塔的耗电量,kWh; W_Q 为冷却水循环泵的耗电量,kWh; W_D 为冷冻水循环泵的耗电量,kWh; W 为机房各设备控制系统的耗电量,kWh。

为在设计上做好制冷空调系统运行能耗控制,在新大楼制冷机房设计时,提出全年平均能效比(*EER*)不小于6.0的1级能效等级指标。而在式(1)中,因控制系统耗电量相对较小,为此在对机房进行高效设计时,将重点针对机房设备进行节能优化设计,对管路系统进行水利优化设计选型。

1.2 新大楼高效机房实现路径

为实现新大楼高效机房能效指标,主要是通过全年负荷模拟、优化系统设备选型、进行能效模拟、精准智能控制、工程优化实施、调试跟踪、和智慧监测诊断七步(见图1)实现中央空调系统安全、可靠、经济、舒适运行的目的。

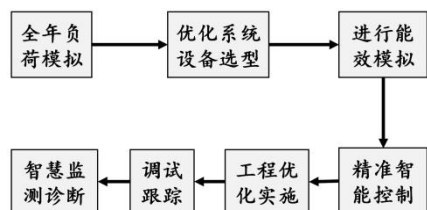


图1 高效机房实现路径图

Fig.1 Achieving roadmaps of the efficient machinery-room

(1) 全年负荷模拟。通过能源模拟分析软件, 对新建大楼集中式空调系统全年 8760 小时负荷进行动态模拟, 根据模拟所得结果分析全年空调负荷特性, 包括: 空调逐时负荷、空调峰值负荷、空调负荷比重分布等, 进而对空调系统参数配置进行初选。

(2) 优化系统设备选型。首先需要对主要设备容量及配置进行比选, 对不同型号、不同支路等进行压降设计, 优化确定系统流程, 确保设备出力平衡; 对系统进行详细水力计算, 准确控制设备、阀组及管路压降, 保证系统管路水力平衡, 并控制最不利系统压降。

其次, 根据设计优化进行设备选型。其中, 空调主机根据全年 10%~100% 的工况设计负荷进行选型, 并重点关注蒸发器、冷凝器在设计工况下的压降, 主机的驱动方式、压缩方式, 以及重启时间、是否变流量、电气条件、安装条件、变频驱动谐波干扰控制等其他条件。冷却水泵则建议采用变流量+变扬程设备, 通过系统水力计算确定额定扬程, 通过变频电机驱动改变运行工况, 通过供回水温差调节系统流量。

根据尚星航与季日臣^[6]的研究报道, 直角三通能量损失较大, 减小夹角有助于减小能量损失, 提高过流能力。因此, 对于管路选型上, 则建议选用顺水三通、S 弯头并适当放大管径; 而管件选型则建议采用低压降止回阀、过滤器等, 以便有效降低管路局部阻力和沿程损失。

冷却塔则是根据医院所在地室外设计湿球温度、典型气象年湿球温度分布, 进行冷却水处理逼近度设计; 对冷却塔在设计工况、实际运行典型工况进行选型。建议选择变频直流驱动的高风电比、谐波系数 $\leq 5\%$ 的高效风机, 布水器设置时则需确保冷却水量在 30%~100% 变化时均匀布水。优化后可使得在空调主机制冷量和冷却水循环流量趋于稳

定的情况下, 空调主机冷却水回水温度下降 2°C ~ 2.5°C , 空调主机制冷系数升高, 压缩机功耗降低, 空调主机能效提高 6%~7.5% 左右^[12]。

(3) 运行能效模拟。在设备初步选型后, 考虑不同湿球温度、负荷工况条件下, 不同主机、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔组合运行的能效进行比较, 确定最优运行模式组合, 并确定全年运行策略。根据确定的运行策略对全年拟定的环境湿球温度条件、运行工况, 对全年 8760h 空调负荷进行运行能效模拟, 以确保设计能效指标达标。

(4) 精准智能控制。根据国家发展和改革委员会在 2020 年全国节能宣传周发布的“基于冷却塔群变流量控制的模块化中央空调节能技术”, 冷却塔群变流量控制(群控)的应用, 可降低冷却水温度, 提升冷却效率, 减小冷却塔风扇、冷却水泵和主机等的能耗。医院新大楼也将采用精准智能控制, 通过监测、采集、分析冷冻水和冷却水流量、温度、压差, 以及空调主机、水泵和冷却塔风机功率参数等, 调整空调系统运行工况, 进而实现制冷系统能效耦合, 使得冷却泵、冷却塔风机、空调主机等能耗之和最低。主要表现在: 按需调节集中式空调系统主机台数及出水温度, 降低机组能耗; 按需调节冷冻水泵、冷却水泵运行频率, 降低水泵能耗; 按需调节冷却塔风机频率, 实现均匀布水、变频运行。

(5) 工程实施优化。主要是通过 BIM 三维建模指导系统构建与现场施工, 以大幅提升设计与现场施工的一致性, 及时发现不合理的部分并做出优化调整, 以缩短整体施工周期。

(6) 调试跟踪。主要分为施工验收、系统调试、系统调适、系统交付、运行跟踪以及策略优化 6 步。其中, 系统交付时需注重舒适性指标测试和调试, 重点关注空调区域温度、湿度、洁净度、风速、正负压、噪音等; 运行跟踪过程需对响应指标进行测试和调试, 重点关注冷热源机房供回水温度、压力等参数达到设定值所需时间, 以及中央空调主机、水泵、换热器出力和智能控制系统响应性情况; 策略优化时则需重点关注能效指标测试和调试, 对系统实际能效数据与模拟分析数据进行对比分析, 并进行进一步调适、优化。

(7) 智慧监测诊断。通过系统运行数据的远程监测, 能效对标, 及时对系统影响能效的因素进

行预警处理;通过对系统运行数据进行人工智能分析,给出系统优化运行建议和改进措施。建立设备能效分析与节能诊断,针对不合理环节采取对应解决方案,提升设备运行能效。

2 医院既有集中式空调系统节能实现路径

张有华^[12]与李元阳等^[13]指出 90%既有建筑制冷机房运行能效(EER)低于 3.5。因此,针对既有建筑制冷机房如何实现节能便至关重要。在既有建筑集中式空调系统节能方面需做到一手抓运维管理,一手抓节能改造,力求从源头降低能源消费,推进节能降耗,降低医院万元收入能耗支出(G)。

$$G = \frac{C}{I} \quad (2)$$

式中:年总能耗支出 C 为医院发生的水、电、气、热等能耗费用之和,元;医院年总收入 I 包括“财政拨款收入”、“事业收入”等全部收入,万元。

2.1 既有建筑集中式空调系统运维管理

以医院某大楼集中式空调系统为例,其建成于

2014 年,大楼共设有 3 套集中式空调系统。其中,门诊部和住院部均分别采用一套两管制(风机盘管+集中新排风)集中式空调系统,其主机分别为 2 台定频水冷式离心机组(1 备 1 用,共 4 台,COP 均为 3 级);手术室及 ICU 共用一套四管制(集中新排风)净化空调系统,主机为 1 台定频水冷式双机头螺杆机组(COP 为 3 级),并预留与住院部集中式空调系统冷冻水系统接驳的管道。为做好节能化运维管理,主要通过智能化、制度化、专业化、精细化“四化”进行管理。

(1) 运维管理智能化。主要依托楼宇自控 BA 系统(见图 2),通过运行状态监控与故障监测,对建筑物内冷热源系统、空调通风系统、给排水系统等进行高效率的管理与控制,旨在达到统一管理、分散控制目的。同时,通过采用楼宇自控系统,可以合理利用设备,降低能量消耗,节约能源,节省人力,确保设备的安全运行,即做到节能降耗和延长设备使用寿命,大大提高系统运行的经济效益。

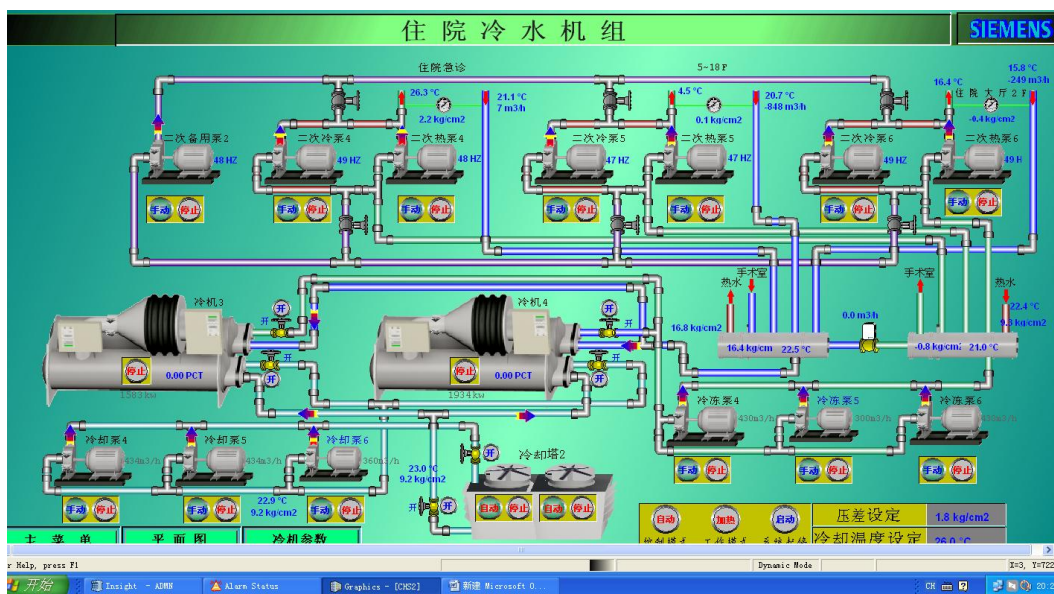


图 2 中央空调机房设备控制系统

Fig.2 The control system for the equipment of central air conditioning room

(2) 运维管理制度化。通过制定相关节能降耗方案,明确集中式空调系统主机责任化运行管理职责,提高公共区集中式空调集约化管理要求,加强诊室/办公区盘管空调等非公共区空调温度调节属地化管理工作,以降低系统运行能耗。

(3) 运维管理专业化。通过依托专业公司在

制冷季节开始前、启用制冷模式时和制冷模式运行期间,对空调主机、冷却塔、管路,以及末端过滤器、过滤网进行清洗,以增强换热效率,降低损耗,实现节能降耗。

(4) 运维管理精细化。为实现 2023 年迎峰度夏节电措施目标,制定了公共区集中控制式中央空

调末端设备夏季供冷实施细则，落实落细供暖暂停且制冷全面启用前的过渡季节集中式空调系统启用原则，以及全面转换到制冷季节后集中式空调系统主机运行管理与各区域末端温度设定的具体细则。通过严格落实细则，在医疗业务量大幅增长的情况下，2023 年 8、9 月大楼用电量仍同比下降了约 2.66%，每小时用电负荷约减小 53kW（见图 3）。

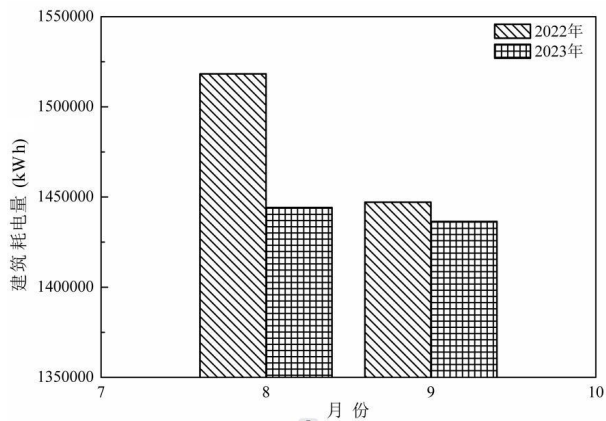


图 3 2023 年夏季节电措施实施后大楼建筑耗电量对比
Fig.3 Comparison of building energy consumption after the implementation of energy saving measures in the summer of 2023

2.2 既有建筑中央空调系统节能改造

冷水机组耗电量约占集中式空调系统的 60%^[9,17]，而变频器又具有可优化提高集中式空调系统冷源机组效率，节约能源；功率因素高，减少机组低功率因素造成的经济损失；减轻浪涌问题，减小对电机及电网的冲击；延长机组寿命、降低噪声等诸多好处。因此，基于手术室全年均对温湿度有较为严格的要求，结合其集中式空调系统主机需全年开机进行制冷运行的特点，选取医院某大楼手术室集中空调系统中额定功率为 264.5kW 的 1 台定频水冷式双机头螺杆机组（COP 为 3 级）进行变频改造研究，以实现节能降耗。

E-CATe 软件为开利公司自主研发以用于开利品牌冷水机组能效计算的专业软件，可对开利定频和变频机组进行较好的能效模拟计算。因此，本文便通过专业的 E-CATe 软件，在保证冷却水、冷冻水进出温度等参数不变的情况下，对额定功率为 264.5kW，能效（COP）为 3 级的开利水冷式螺杆机组单机头变频改造前后不同负荷工况进行模拟，得到变频改造前后的机组制冷效率（见表 2）。

表 2 变频改造前后制冷效率对比

Table 2 Comparison of refrigeration efficiency after frequency conversion transformation of central air conditioning unit

制冷负荷百分比	25%	50%	75%	100%
改造前制冷能效	7.631	6.945	6.454	5.716
改造后制冷能效	10.98	7.867	7.115	5.659

从表 2 中的数据对比可以看出，变频改造后，机组能效（COP）在部分负荷下均有较大提升，并远远高于改造前的定频螺杆机组。

鉴于开利公司的 Chiller System Optimizer 软件（CSO 冷水机组系统优化软件）是开利自主研发的集中式空调系统能耗运行模拟软件，该软件可按照建筑实际运行负荷大小选择对应的水泵、冷却塔、冷水机组，并根据当地气温条件设置运行时间进行运行能耗模拟，以实现集中式空调系统机房设备及运行时间进行综合选型和模拟分析，是进行高效机房能效仿真计算的专业软件。

因此，本文将前述水冷式螺杆机组单机头变频改造前的 E-CATe 软件模拟数据包导入 CSO 软件，并根据当地 2023 年实际月平均气温、月平均最低气温、月平均最高气温，对机组变频改造前的月耗电量进行迭代仿真计算，以使得仿真计算结果逼近于机组实际耗电量，并由此确定机组制冷负荷。

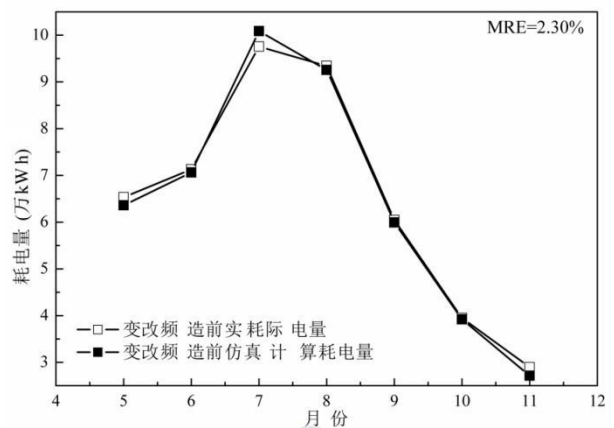


图 4 变频改造前仿真计算耗电量与实际耗电量的对比
Fig.4 Comparison between simulated power consumption and actual power consumption before frequency conversion transformation of central air conditioning unit

图 4 为根据当地实际气温，对水冷式螺杆机组变频改造前的仿真计算耗电量与实际耗电量的对比。从图 4 中可以看出，仿真计算结果与实际耗电

量较为一致, 并根据式 (3) 平均相对误差 MRE 计算公式, 其平均相对误差绝对值为 2.30%。因此, 表明该仿真计算耗电量结果趋近于真实值, 即其对应的各月制冷负荷亦将趋近于真实制冷负荷 (见表 3)。

$$MRE = \frac{1}{N} \sum \frac{|W_{Ls} - W_{pre}|}{W_{Ls}} \quad (3)$$

表 3 变频改造后全年运行情况仿真计算结果

Table 3 The simulation calculation results of central air conditioning unit after frequency conversion transformation in the full year

月份	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	总计
T_M	5	6.5	14	19	23.5	26.5	30.5	31.5	26	19.5	13	7	—
T_{ML}	2	3	12	16	20	23	27	27	22	15	9	3	—
T_{MH}	8	10	16	22	27	30	34	36	30	24	17	11	—
螺杆机单机头变频改造前后仿真计算结果对比													
Q_{LZ}	31745.0	45725.4	96538.7	170913.0	410505.4	464758.6	558830.9	518353.9	395564.4	270507.6	193265.3	62370.0	3219078.1
W_{pre-Q}	4160.0	6440.2	13870.5	24770.0	63604.8	70632.0	100872.0	92563.2	59934.0	39204.0	27144.0	8910.0	512104.7
t	200	260	350	500	720	720	720	720	700	600	600	300	—
P_Q	20.8	24.77	39.63	49.54	88.34	98.1	140.1	128.56	85.62	65.34	45.24	29.7	—
P_H	13.77	17.22	26.55	34.44	73.6	83.4	115.4	103.98	70.4	56.6	30.64	20.66	—
W_{pre-H}	2754.0	4477.2	9292.5	17220.0	52992.0	60048.0	83088.0	74865.6	49280.0	33960.0	18384.0	6198.0	412559.3

表 3 中: T_M 为月气温平均值, $^{\circ}\text{C}$; T_{ML} 为月最低气温平均值, $^{\circ}\text{C}$; T_{MH} 为月最高气温平均值, $^{\circ}\text{C}$; Q_{LZ} 为制冷负荷量, kWh ; W_{pre-Q} 为单机头变频改造前仿真计算耗电量, kWh ; t 为当月机组运行小时数, h ; P_Q 为单机头变频改造前平均功耗, kW ; P_H 为单机头变频改造后平均功耗, kW ; W_{pre-H} 为单机头变频改造后仿真计算耗电量, kWh 。

对表 3 中的数据进行分析可以发现, 在相同制冷负荷下, 改造后的变频螺杆机组平均功耗将明显低于改造前的平均功耗, 耗电量明显下降。即, 根据式 (4) 可知, 制冷效率 COP 将明显提升。

$$COP = \frac{Q_L}{W} \quad (4)$$

式中: Q_L 为空调冷水机组的制冷量, kWh ; W 为对应制冷量所需的耗电量, kWh 。

根据表 3 中变频改造前后的耗电量数据对比, 可得出, 在变频改造后全年约可节约 99545.4kWh, 节能率约为 19.44%。根据生态环境部《关于做好

式 (3) 中: N 为月份数量; W_{Ls} 为冷水机组各月实际耗电量, kWh ; W_{pre} 为冷水机组变频改造前各月仿真计算耗电量, kWh 。

将前述水冷式螺杆机组单机头变频改造后的 E-CATe 软件模拟数据包导入 CSO 软件, 并结合变频改造前仿真计算获得的逐月制冷负荷量, 对该水冷式螺杆机组单压缩机变频改造后的全年运行情况进行仿真计算, 结果见表 3。

2023-2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》(环办气候函〔2023〕43 号), 2022 年度全国电网平均排放因子为 0.5703tCO₂/MWh (每度电排放 0.5703kg 二氧化碳), 即: 可减少 CO₂ 排放量约 56770.74kg, 合计约 56.77 吨。因此, 通过对能效较低的定频主机进行变频改造, 可有效地实现节能减排, 助推绿色低碳发展。

针对双机头定频水冷式螺杆机组, 因双机头同时工作时属空调负荷较大的情况, 其变频节能性不强, 而双机头同时进行变频改造成本较高。因此, 对于该类双机头的定频水冷式螺杆机组进行单机头变频改造, 将可有效降低变频改造成本。如本变频改造案例针对 COP 为 3 级的开利公司双机头定频螺杆机组进行单机头变频改造, 根据仿真所得的年节电量进行核算, 约 3 年便可收回成本。集中式空调系统冷水机组连续工作设计使用寿命一般约为 15 年, 而针对维护较好的水冷式空调机组, 其

实际使用寿命约可达 20 年以上, 故针对医院某大楼当前使用约 10 年的定频水冷式双机头螺杆机组进行变频改造, 将不仅可降低医院万元收入能耗支出, 还将具有较好的经济效益。

3 结论

本文从集中式空调系统在节能改造、节能管理和节能设计的研究现状方面进行了剖析, 进而针对医院新建集中式空调系统高效机房设计与实现的路径进行了简要阐述; 对医院既有集中式空调系统在运维上采取的节能管理举措进行了介绍, 并对既有建筑集中式空调系统中能耗占比最高的空调主机在变频改造前后的能效进行了对比, 最终形成结论如下:

(1) 医疗机构应做好能效提升, 持续推进重点用能系统绿色低碳改造, 从源头降低能源消费, 推进节能降耗, 降低医院万元收入能耗支出。

(2) 针对医院新建集中式空调系统, 应重点推进高效机房设计, 并在设计时适当提高全年综合能效 (*EER*) 指标, 从设计、选型上实现节能降耗。

(3) 针对医院既有集中式空调系统, 需注重从“智能化、制度化、专业化、精细化”等方面做好运维管理, 提升集中式空调系统性能, 降低系统运行能耗, 降低损耗, 实现节能。

(4) 针对既有集中式空调系统, 还需注重对集中式空调系统的节能改造, 尤其是对在集中式空调系统主要设备能耗占比最高的空调主机进行变频改造, 不仅可以实现节能降耗, 还可有效降低碳排放。

(5) 针对 *COP* 为 3 级的双机头定频螺杆机组, 采取单机头变频改造, 将具有较好的经济效益。

在推进医院节能降耗过程中, 应既要关注新建建筑集中式空调系统的节能优化设计, 又要重视既有建筑集中式空调系统的运维管理和节能改造, 力争为实现“双碳”目标贡献力量。

参考文献:

- [1] 张瑶. 医院建筑用能统计及评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [2] 朱永松, 罗蒙, 甘宁. 大型综合性医院节能管理的分析与对策[J]. 中国医院, 2011, (2): 73-75.
- [3] 胡辉. 医院中央空调系统运行管理的综合节能分析[J]. 建筑与预算, 2021, (10): 62-64.
- [4] 陈国平. 医院建筑暖通空调节能思路及措施研究[J]. 通讯世界, 2018, (6): 264-265.
- [5] 李成浩. 某医院中央空调冷冻机房节能改造分析[J]. 广西节能, 2023, (2): 38-39.
- [6] 刘欢, 李冬, 刘元明. 浅议智慧医院中央空调系统节能运维管理[J]. 江苏卫生事业管理, 2021, 32(11): 1510-1514.
- [7] 刘元明, 刘欢, 李冬. 智慧医院中央空调系统节能设计与能效分析[J]. 工程经济, 2021, 31(12): 69-71.
- [8] 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, (7): 117-122.
- [9] 陶根泉. 中央空调循环水泵现状调查和节能分析[J]. 能源研究与管理, 2023, 15(1): 173-176.
- [10] 刘畅, 罗运有. 佛山市某医院空调系统节能改造方案[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(10): 39-42.
- [11] 陈辉. 医院智能化中央空调节能管控系统应用研究[J]. 居舍, 2023, (24): 169-172.
- [12] 张有华. 基于高效制冷机房技术的分析与探讨[J]. 居舍, 2023, (11): 167-169.
- [13] 李元阳, 邱艺德, 方兴, 等. 高效制冷机房标准化设计及其应用[J]. 制冷与空调, 2023, 23(6): 92-100.
- [14] 林伟. 医院中央空调系统设计方案与运行分析[J]. 中国高新科技, 2023, (13): 25-27.
- [15] Handbook A. ASHRAE Handbook-HVAC applications (SI) [M]. ASHRAE Inc., Atlanta, GA, 2011.
- [16] 尚星航, 季日臣. 基于 CFD 的汇流三通管阻力特性与流场可视化分析[J]. 甘肃科技纵横, 2021, 50(3): 25-28.
- [17] 李壮举, 郭虹. 中央空调冷水机组的多模型融合[J]. 计算机仿真, 2022, 39(8): 311-316.