

并联变频永磁同步电机水泵在制冷机房中的节能性研究

牛梦涵, 崔红社*, 周腾德, 刘 龙

(青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525)

摘要: 在制冷机房系统中水泵能耗占机房总能耗的 30%。提出一种新的水泵运行模式, 即去除水泵出口单向阀和应用永磁同步电机, 在所有负荷区间, 2 台冷冻水泵、冷却水泵同步运行, 通过调整水泵运行频率, 满足机组流量变化需求。利用 TRNSYS 仿真模拟软件建立制冷机房系统的模型, 模拟该运行模式对水泵能耗及制冷机房运行能效的影响。模拟结果表明: 相较于改造前, 去除水泵出口单向阀后空调水系统阻力降低 15%, 进而优化水泵选型。在改造方案下, 1 台和 2 台冷水机组开启时, 水泵节能率分别为 26.4%、29.7%, 制冷机房系统节能率分别为 6.3%、7.8%, 机房逐时 EER(综合能效) 分别可达 5.49、5.00。

关键词: 水泵改造; 同步变频; 制冷机房; TRNSYS; 建筑节能

中图分类号: TK01+8

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)03-0095-08

Research on the energy saving of parallel variable frequency permanent magnet synchronous motor pump in refrigeration room

NIU Menghan, CUI Hongshe*, ZHOU Tengde, LIU Long

(School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The energy consumption of water pump accounts for 30% of the total energy consumption of refrigerator room. In this paper, a new operation mode of water pump is proposed, that is, removing the check valve at the pump outlet and applying the permanent magnet synchronous motor. In all load zones, two chilled water pumps and cooling water pumps run synchronously. By adjusting the operation frequency of water pumps, the needs of the unit flow changes are met. TRNSYS is used to establish the refrigeration room system model, and the influence of the operation mode on the energy consumption of the water pump and the energy efficiency of the refrigeration room is simulated. The simulation results show that, compared with the scheme before the transformation, the resistance of air conditioning water system is reduced by 15% by removing the water pump outlet check valve, and then the selection of water pump is optimized. Under the optimized scheme, when a single chiller and two chiller units are started, the energy saving rates of the water pump are 26.4% and 29.7%, and the system energy saving rates are 6.3% and 7.8% respectively, with hourly EER of 5.49 and 5.00 respectively.

Key words: reconstruction of water pump; synchronous frequency conversion; refrigeration

收稿日期: 2023-02-23

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(J18KA189)

作者简介: 牛梦涵(1998—), 女, 河北石家庄人。硕士, 研究方向为建筑节能。E-mail: niuemenghan98@163.com。

* 通信作者: 崔红社(1971—), 男, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事人工环境与建筑节能方面的研究。E-mail: cuihongshe@sina.com。

room; TRNSYS; building energy saving

“双碳”目标对办公建筑中空调系统的能耗提出了更高要求。据统计,空调能耗占办公建筑能耗的30%~50%^[1],其中机房水系统能耗约占制冷机房总能耗的30%^[2],因此水系统节能降耗对整个制冷机房系统节能具有重要意义。随着变频水泵在大型建筑空调系统中的广泛应用,许多学者对变频水泵的节能运行展开研究。俞倩等^[3]、林立昌等^[4]、刘洋^[5]对冷冻、冷却水泵的运行频率进行优化,发现水泵变频运行节能效果显著,但是水泵频率并不是越低越好,相对于异步电机水泵而言,频率越低,效率越低,并且水流量过低会影响冷水机组的性能。谢社平等^[6]分析发现永磁同步电机可以解决现有泵站效率低、偏工况点、欠负荷运行的问题。王亮等^[7]、邵光明等^[8]对并联水泵运行特性进行研究,发现水泵同步变频运行节能率大,且优于异步变频。现有大部分研究仅仅围绕水泵变频运行进行分析,以求达到节能的效果,但缺乏对水泵电机、管网阻力以及水泵运行模式多方面耦合优化的研究。

本文针对两机对两泵的制冷系统,结合高效永磁同步电机在变频运行下的高效率特点,提出一种新的水泵运行模式,即在所有负荷区间,2台水泵同步开启变频运行。此时可以去除水泵出口的单向阀,进而优化管网阻力。基于青岛市某办公建筑搭建 TRNSYS 仿真模型,模拟分析该运行模式对水泵能耗、制冷机房运行能效的影响。

1 空调水系统优化分析

1.1 永磁同步电机水泵应用

依据设计负荷所选择的冷热源设备,是为了保证空调系统在最不利工况下可以正常运行^[9],但是在实际运行中,办公建筑入驻率为70%~80%^[10]。青岛市某办公建筑制冷季逐时冷负荷变化曲线如图1所示,从图1中可以看出,制冷机房系统大多数时间在部分负载率下运行,低负荷运行时,需要对水泵进行变频调节以调整供冷量。

高效永磁同步电机与异步电机的效率曲线如图2所示。目前常用的水泵电机以异步电机为主,当负载率大于90%时,电机效率可达90%;但当负载率小于70%时,异步电机效率剧烈衰减^[11]。现有部分制冷机房使用高效永磁同步电机,在整个调速范围内电机都可以保持85%以上的效率,最高可达97%^[12],可有效解决水泵在低负载率下电机效率衰减严重的问题。

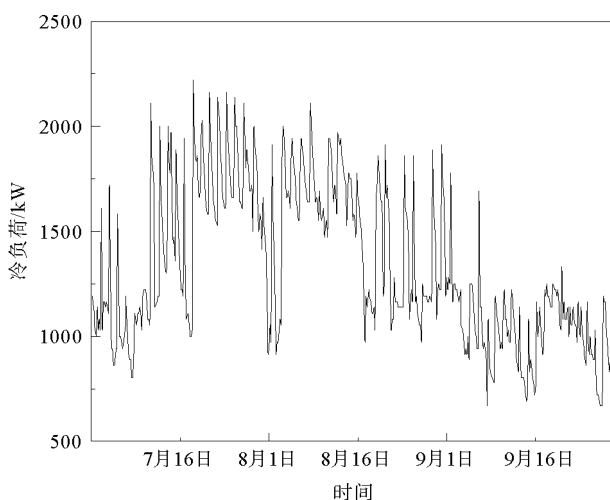


图1 某办公建筑制冷季逐时冷负荷

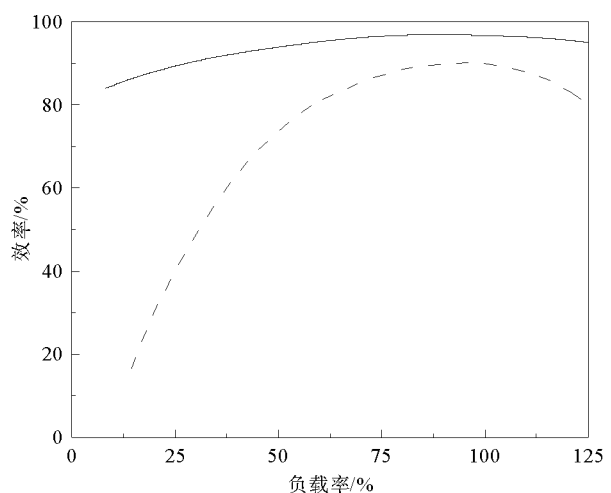


图2 高效永磁同步电机与三相异步电机的效率曲线

——永磁同步电机效率曲线; - - 异步电机效率曲线

1.2 水系统阻力及控制策略优化

在高效制冷机房的水泵设备选型阶段应考虑到管路阻力损失的因素,合理选择水泵设备^[13]。如图3

所示,水泵原设计状态点 $A(Q_1, H_1)$,保持流量一定时,管路优化后阻力变为 H_2 ,则优化后的管网特性曲线变为 IV,优化后的水泵状态点变为 $B(Q_1, H_2)$ 。对于变频水泵,水泵输送流体的过程中,其能量为流体的质量流量与输送高度的乘积,水泵能耗与流量、扬程和效率的关系表达式为

$$N = \frac{\rho g H Q}{3.6 \times 10^6 \eta_p \eta_m \eta_{vfd}} \quad (1)$$

式中: N 为水泵总能耗,kW; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; g 为重力常数,取值 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; H 为水泵扬程,m; Q 为水泵流量, m^3/h ; η_p 为水泵效率,%; η_m 为电机效率,%; η_{vfd} 为变频器效率,%。

根据式(1),水泵能耗与流量、扬程成正比关系,设计水泵、优化后水泵的流量与扬程乘积在图 3 中用面积 F_1 和 F_2 表示,其中 $F_1 = F_2 + F_0$,当水泵效率保持一定时,减少的面积 F_0 即代表了水泵能耗的节能量。因此减少管路不必要的弯头、阀门等部件,可降低机房局部阻力损失,设备选型时水泵功率减小,实现节能。

目前既有办公建筑制冷机房运行模式为 1 台冷水机组开启时,对应 1 台冷冻水泵、1 台冷却水泵及 1 台冷却水塔,运行原理如图 4 所示。针对这种运行模式必须在水泵前端加单向阀,以防止水倒流致使电机损坏^[14]。在机房中对管路局部阻力影响最明显的部件之一是单向阀,其阻力为 $4 \sim 7 \text{ m}$ 水柱,对于办公建筑,其冷冻水管路、冷却水管路阻力大约为 30 m 水柱,减去水泵出口的单向阀,空调水系统阻力可降低 15% 左右,进而降低水泵轴功率。

笔者提出一种新的水泵运行模式:在所有负荷区间,2 台冷冻水泵、冷却水泵同步运行。即当空调负荷低于 50% 时,1 台冷水机组开启,2 台高效永磁同步电机水泵开启且同步低频运行;当空调负荷高于 50% 时,2 台冷水机组运行,随着系统用水量的增加,逐步提高 2 台水泵的运行频率以满足冷水机组的流量需求。在 2 台水泵同时启停且同步变频运行下,可以去除水泵出口的单向阀,优化管网阻力。

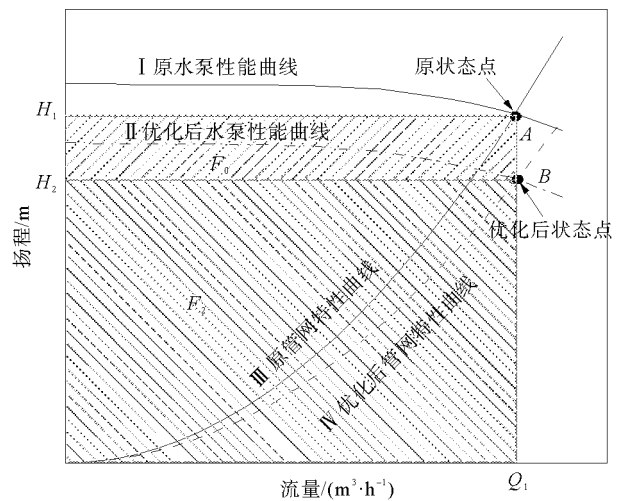


图 3 水泵特性曲线

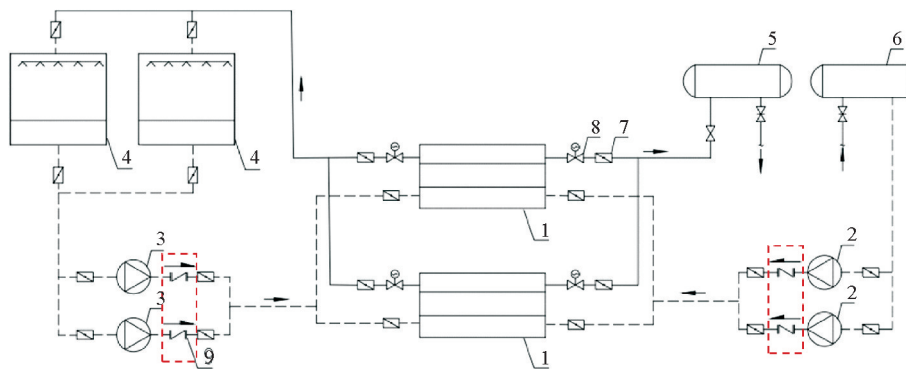


图 4 制冷机房运行原理

1—冷水机组;2—冷冻水泵;3—冷却水泵;4—冷却水塔;5—集水器;6—分水器;7—蝶阀;8—电动调节阀;9—单向阀

如图 5 所示,1 台额定流量为 Q_1 的水泵在高频下运行的性能曲线为 I,当空调负荷高于 50% 时,2 台水泵同步高频并联运行,曲线如图 5 中 II 所示, D 点为 2 台水泵同步高频下并联运行时的状态点, A 点为并联运行时每 1 台水泵的工况点,此时水泵在高效区间运行。

当空调负荷低于 50% 时,如果按照原有 1 机对 1 泵的运行方式,假设此时不改变水泵频率,1 台冷水机组开启只开启 1 台水泵时,1 台水泵在高频运行下与管网性能曲线 V 交于 B 点,为此时水泵的运行工况点。此时 Q_B 大于泵的额定流量 Q_1 ,水泵效率 η_2 未在高效区间,长时间运行会缩短设备寿命。现提出 1 台机组开启对应 2 台水泵同步变频调节的运行方式,水泵转速为 n_1 时 1 台水泵性能曲线为 III,2 台水泵并联性能曲线为 IV,与管网性能曲线交于 B 点,C 点为水泵并联运行中 1 台水泵的工况点,水泵效率为 η_1 ,保持水泵的高效运行。由式(1)可知水泵能耗与 H 、 Q 和 η 有关,2 种运行方式与管网性能曲线均交于 B 点,扬程和流量相同, $\eta_1 > \eta_2$,2 台水泵并联低频运行的能耗在一定程度上会低于 1 台水泵高频运行的能耗。

在本研究中,应用高效永磁同步电机水泵,基于其在所有负荷区间都有较高的效率,提出一种水泵同步并联运行的控制策略,既可以满足冷水机组对水流量的需求,又可以去除水泵出口处的单向阀,优化管路阻力,进而降低水泵运行能耗。

2 模型搭建

2.1 建筑概况

以青岛市某办公建筑空调机房为研究对象,该项目制冷季采用 2 台额定制冷量为 1225 kW 的冷水机组进行制冷,2 台冷冻水泵、2 台冷却水泵、2 台冷却塔一一对应,相关设备参数见表 1。

该项目从 2020 年开始投入使用,对其 3 年制冷季运行数据进行整理分析发现,对于青岛地区仅在 8 月室外温度较高时需要同时开启 2 台冷水机组,制冷季 50% 以上的时间开启 1 台冷水机组即可满足供冷需求,冷水机组开机时间见表 2。

原有管路冷冻水、冷却水系统阻力分别为 310、290 kPa,通过实测该项目水泵出口处单向阀两侧的压力,得到单向阀阻力为 60 kPa,去除单向阀后冷冻水泵、冷却水系统阻力分别为 250、230 kPa。根据水泵流量与扬程选择合理的水泵,管路优化前后选取的设备参数见表 3。

表 2 青岛市某办公楼冷水机组开机时间

年份	1 台冷水机组 开机时间/h	占制冷季 比例/%
2020	430	65
2021	320	53
2022	360	57

表 1 空调系统设备参数

设备	参数	数量/台
单螺杆式冷水机组	制冷量 1225 kW;输入功率 186.7 kW;额定 COP 6.5;蒸发器流量 210 m ³ /h;冷凝器流量 243 m ³ /h	2
冷冻水泵	$H=33$ m; $Q=200$ m ³ /h; $P=30$ kW	2
冷却水泵	$H=31$ m; $Q=300$ m ³ /h; $P=37$ kW	2
冷却塔	$P=5.5 \times 2$ kW	2

表 3 改造前后水泵设备参数

	设备	扬程/m	流量/(m ³ ·h ⁻¹)	功率/kW	电机类型
改造前	冷冻水泵	33	200	30	三相异步电机
	冷却水泵	31	300	37	
改造后	冷冻水泵	25	200	22	高效永磁同步电机
	冷却水泵	24	300	30	

2.2 TRNSYS 模型搭建

TRNSYS(Transient System Simulation)仿真模拟软件可以调用特定功能模块,给定输入条件,建立各模块的连接,对整个系统进行瞬时能耗模拟分析^[15-16]。通过 TRNSYS 搭建制冷机房模型,模拟水泵改

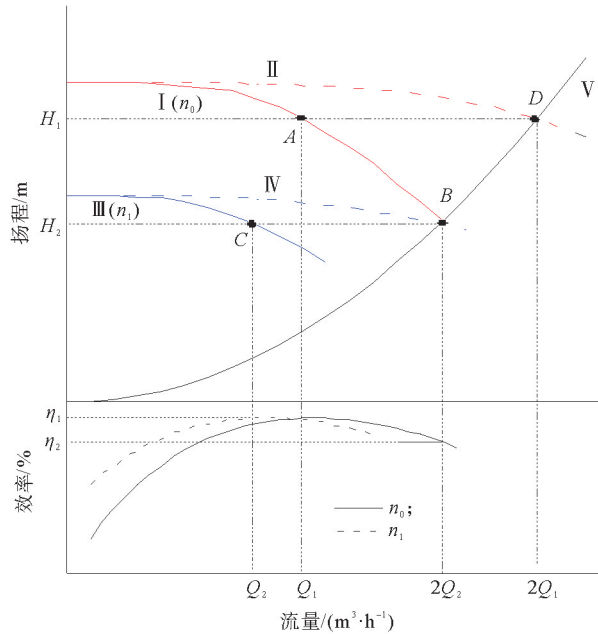


图 5 水泵并联运行工况分析

造后机房系统运行能耗情况,从而分析水泵改造对制冷机房运行能效的影响。

模拟条件如下:

- 1) 模拟地点为青岛,将青岛的气象参数及 DeST 模拟的逐时冷负荷编写为外部文件导入 TRNSYS;
- 2) 冷水机组由厂家提供的参数作为外部文件导入 TRNSYS,保持冷水机组 COP 不变;
- 3) 水泵轴功率与流量性能曲线由厂家提供的数据拟合得到。

$$P = P_{\text{rat}}(c_1 + c_2\gamma + c_3\gamma^2 + c_4\gamma^3) \quad (2)$$

式中: P 、 P_{rat} 分别为水泵功率、水泵额定功率, kW; γ 为当前流量与额定流量比值; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 为多项式拟合系数,其值见表 4。

基于以上条件建立能耗仿真模型如图 6 所示。

表 4 水泵功率拟合系数

水泵性能系数	改造前		改造后	
	冷冻水泵	冷却水泵	冷冻水泵	冷却水泵
c_1	-0.949 58	-1.971 34	0.815 60	-1.089 03
c_2	4.681 86	7.945 27	-3.273 11	4.166 06
c_3	-7.234 29	-10.447 70	4.270 52	-5.357 57
c_4	4.500 00	5.472 60	-0.813 32	3.280 22

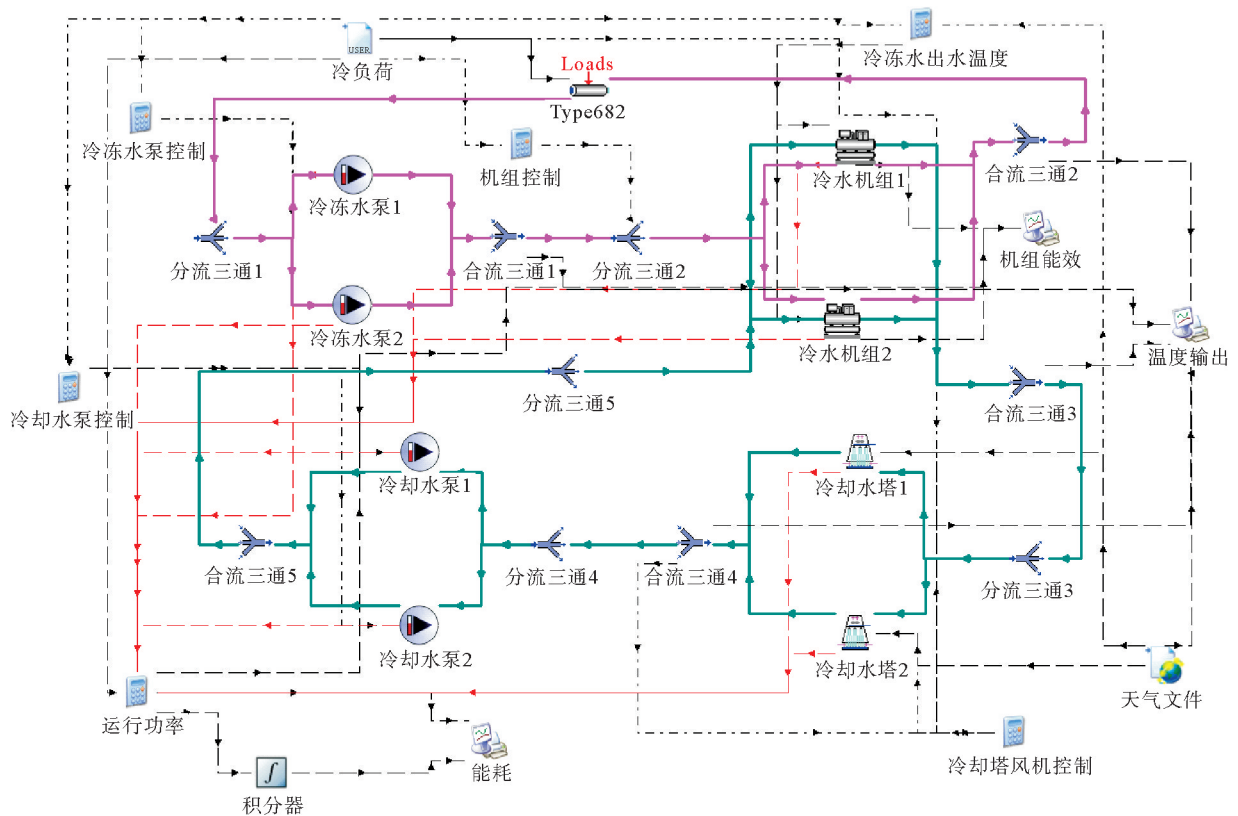


图 6 TRNSYS 能耗仿真模型

3 改造方案及仿真分析

为了研究水泵改造后对机房系统能效的影响,利用 2.2 节搭建的 TRNSYS 模型分别对改造前和改造后的方案进行仿真模拟,验证水泵改造的节能性。

选取 2022 年 7 月 4 日和 9 月 5 日作为 2 台和 1 台冷水机组开启时的典型日,对 2 种工况分别进行模拟。空调系统运行时间为 7:00—17:00。图 7 为典型日的逐时室外环境干球温度、湿球温度及冷负荷变化情况。7 月室外环境温度高,空调冷负荷大于 50% 负荷,开启 2 台冷水机组;9 月室外环境温度低,空调冷负荷小于 50% 负荷,开启 1 台冷水机组。

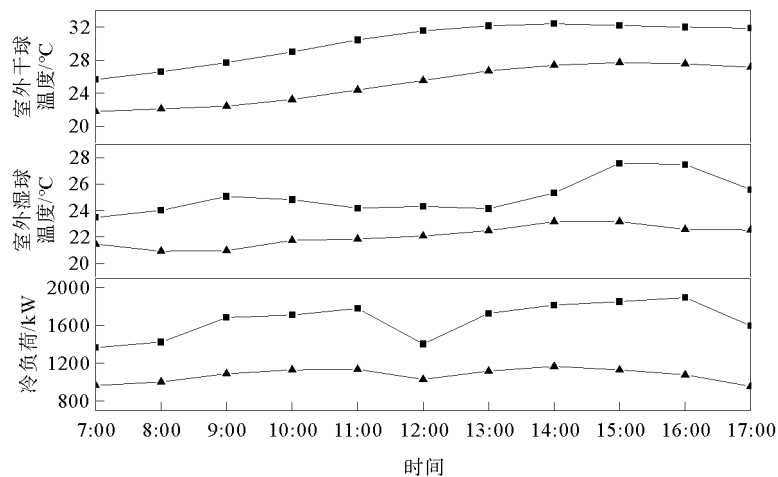


图7 典型日逐时室外干湿球温度及冷负荷
—■— 7月4日；—▲— 9月5日

3.1 方案对比

为验证水泵改造后制冷机房系统的节能程度,对比水泵改造后制冷机房系统的节能性。将改造前后的冷冻水出水温度均设定为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,改造前后具体方案见表5。

表5 改造前后运行方案参数

方案	机组开启数量/台	冷冻水泵				冷却水泵				冷却水塔		
		功率/kW	扬程/m	开启数量/台	频率/Hz	功率/kW	扬程/m	开启数量/台	频率/Hz	功率/kW	开启数量/台	频率/Hz
改造前	1	30	33	1	45	37	31	1	45	11	1	45
	2	30	33	2	45	37	31	2	45	11	2	45
改造后	1	22	25	2	35	30	24	2	35	11	1	45
	2	22	25	2	45	30	24	2	45	11	2	45

3.2 仿真结果分析

分别对1台和2台冷水机组开启的工况进行分析,以制冷机房系统综合能效(EER)来评价系统运行的优良。EER定义为制冷量与制冷机房总能耗之比,其计算公式为

$$\epsilon = \frac{Q}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4} \quad (3)$$

式中: ϵ 为制冷机房系统综合能效(EER); Q 为制冷机组运行时间段内的累计制冷量,kWh; W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别为制冷机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却水塔的累计耗电量,kWh。

表6为1台和2台冷水机组在对应典型日下,系统运行10h,改造前与改造后机房冷冻水泵和冷却水泵的能耗对比。改造后,1台冷水机组开启时,冷冻水泵、冷却水泵累计节约139kWh,其中水泵节能率为26.4%,系统节能率为6.3%;2台冷水机组开启时,冷冻水泵、冷却水泵累计节约320kWh,水泵节能率为29.7%,系统节能率为7.8%。

表6 改造前后能耗对比

方案	冷水机组开启数量/台	累计耗电量/kWh		
		冷冻水泵	冷却水泵	机房
改造前	1	231	296	2240
	2	465	614	4091
改造后	1	172	216	2100
	2	337	422	3771

改造前后制冷机房系统逐时EER如图8所示。

由图8可以看出,改造后,1台冷水机组开启时,制冷机房系统逐时EER均在5.49左右;2台冷水机组开启时,制冷机房系统逐时EER均在5.0左右。无论是1台冷水机组开启还是2台冷水机组同时开启,改造后相较于改造前的机房能效均得到显著提高。

4 结论

1) 在2泵2机组的配置条件下,取消水泵出口单向阀后系统阻力可以减小约15%,优化水泵选型,减小水泵功率。

2) 应用高效永磁同步电机水泵,基于其在所有负荷区间都有较高的效率,提出一种水泵同时启停并同步并联运行的控制策略:2台制冷机组开启时,2台水泵同步高频并联运行;1台制冷机组开启时,2台水泵同步低频并联运行。

3) 改造后,1台冷水机组开启时,2台水泵同步低频运行,水泵节能率为26.4%,制冷机房系统节能率为6.3%,机房逐时EER在5.49左右;2台冷水机组开启时,2台水泵同步高频运行,水泵节能率为29.7%,制冷机房系统节能率为7.8%,机房逐时EER在5.0左右,机房能效显著提高。

参考文献(References):

- [1] 郝志刚,邓杰文,魏庆芑,等.公共建筑空调系统全过程管理方法研究(2):设计阶段系统优化与能耗、能效目标设定[J].暖通空调,2019,49(1):83-89.
HAO Zhigang, DENG Jiewen, WEI Qingpeng, et al. Research on whole process management method of air conditioning system in public buildings(2): Optimization and energy consumption and energy efficiency target setting in design stage[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019,49(1):83-89.
- [2] DENG J, HE S, WEI Q, et al. Research on systematic optimization methods for chilled water systems in a high-rise office building[J]. Energy and Buildings, 2020, 209: 1-13.
- [3] 俞倩,蒋云凤,王玉刚,等.基于遗传算法的中央空调水系统变流量节能优化研究[J].低温与超导,2019,47(11):66-71.
YU Qian, JIANG Yunfeng, WANG Yugang, et al. Study on optimization of variable flow energy saving of central air-conditioning water system based on genetic algorithm[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019,47(11):66-71.
- [4] 林立昌,刘青荣,阮应君.基于实测数据并联变频水泵运行优化[J].科学技术与工程,2020,20(30):12546-12551.
LIN Lichang, LIU Qingrong, RUAN Yingjun. Operation optimization of variable-speed parallel water pumps based on measured data[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(30):12546-12551.
- [5] 刘洋.基于TRNSYS的中央空调冷却水系统节能优化仿真研究[D].广州:华南理工大学,2013.
LIU Yang. Simulation study of energy saving optimization for cooling water system of central air condition based on TRNSYS[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2013.
- [6] 谢社平,吴桂珍.高效永磁同步电机在泵站节能改造中的应用[J].给水排水,2021,57(S1):34-37.
XIE Sheping, WU Guizhen. Application of high-efficiency permanent magnet synchronous motor in energy-saving reconstruction of pumping station[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021,57(S1):34-37.
- [7] 王亮,卢军,陈明,等.空调系统冷水泵并联变频优化运行[J].暖通空调,2011,41(12):114-116.
WANG Liang, LU Jun, CHEN Ming, et al. Optimal operation of parallel variable frequency chilled water pumps in air conditioning system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2011,41(12):114-116.
- [8] 邵光明,繆小平,彭福胜.并联变频水泵调速特性试验研究[J].暖通空调,2018,48(11):120-125.
SHAO Guangming, MIAO Xiaoping, PENG Fusheng. Experimental research on speed characteristics of parallel connected variable frequency pumps[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2018,48(11):120-125.
- [9] XING F, JIN X, DU Z, et al. Evaluation of the design of chilled water system based on the optimal operation performance of equip-

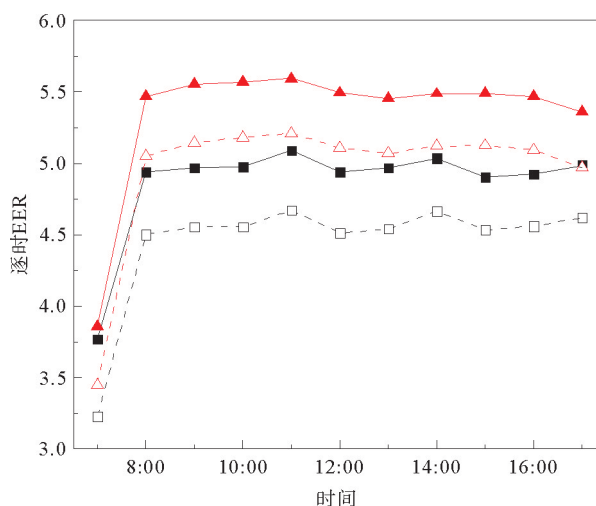


图8 改造前后制冷机房系统逐时EER对比

-△- 改造前(1台冷水机组开启); -▲- 改造后(1台冷水机组开启);
-□- 改造前(2台冷水机组开启); -■- 改造后(2台冷水机组开启)

- ments[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113:435-448.
- [10] 孙锐,崔红社,李言永,等. 青岛市既有办公建筑冷源系统运行调研分析[J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41(7):40-43.
SUN Rui, CUI Hongshe, LI Yanyong, et al. Investigation and analysis on cold source system of existing office buildings in Qingdao[J]. Building Energy & Environment, 2022, 41(7):40-43.
- [11] 王晨光,汤雁翔. 中央空调减振降噪技术在船用冷却水泵中的应用[J]. 核动力工程, 2019, 40(4):189-192.
WANG Chenguang, TANG Yanxiang. Application of vibration reduction technologies for central air conditioning in cooling water pumps[J]. Nuclear Power Engineering, 2019, 40(4):189-192.
- [12] 杜辉,王吉栋,谭晓东. 永磁电机驱动水泵类负载的节能分析与系统改造[J]. 节能, 2016, 35(4):76-78.
DU Hui, WANG Jidong, TAN Xiaodong. Energy-saving analysis of permanent magnet motor driven pumps load and system transformation[J]. Energy Conservation, 2016, 35(4):76-78.
- [13] 张伟锐,邓玉辉,刘坡军,等. 基于 BIM 技术的装配式高效制冷机房分析应用[J]. 安装, 2022(4):72-74.
ZHANG Weirui, DENG Yuhui, LIU Pojun, et al. Analysis and application of prefabricated refrigeration room based on BIM technology[J]. Installation, 2022(4):72-74.
- [14] 马国石. 主给水泵出口止回阀无法正常工作的原因分析及优化[J]. 科技视界, 2019(1):214-216.
MA Guoshi. Feed water pump outlet check valve can not work normally cause analysis and optimization[J]. Science & Technology Vision, 2019(1):214-216.
- [15] 张海丁,李亚奇,刘渊. 基于 TRNSYS 的通风空调系统仿真平台的开发[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(10):90-94.
ZHANG Haiding, LI Yaqi, LIU Yuan. Development of simulation platform for ventilation and air conditioning system based on TRNSYS[J]. Building Energy & Environment, 2018, 37(10):90-94.
- [16] 王洪乾,崔红社,邓鹏杰,等. 基于 TRNSYS 空调水系统能耗预测应用研究[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(1):77-82.
WANG Hongqian, CUI Hongshe, DENG Pengjie, et al. Application study of energy consumption prediction for air conditioning water system based on TRNSYS[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(1):77-82.

(责任编辑 姜锡方;英文校审 程文华)

(上接第 87 页)

- [8] 苏东宾,聂志勇. 浅谈如何通过建筑物高度控制来形成良好的城市景观[J]. 国际城市规划, 2007(2):104-108.
SU Dongbin, NIE Zhiyong. How to build an appreciative urban landscape through the height control on construction[J]. Urban Planning International, 2007(2):104-108.
- [9] 钮心毅,宋小冬,陈晨. 保护山体背景景观的建筑高度控制方法及其实现技术[J]. 上海城市规划, 2014(5):92-97.
NIU Xinyi, SONG Xiaodong, CHEN Chen. Developing building height restriction for preserving views to mountain backdrop[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2014(5):92-97.
- [10] 徐磊青,周峰,吴人韦. 山景城市天际线的偏好与景观知觉:建筑高度与视廊数量的影响[J]. 中国园林, 2013, 29(10):46-52.
XU Leiqing, ZHOU Feng, WU Renwei. The preference and perception of the skyline of mountain-landscape city: The influence of building height and view corridor numbers[J]. Chinese Landscape Architecture, 2013, 29(10):46-52.
- [11] 杨俊宴,史宜. 总体城市设计中的高度形态控制方法与途径[J]. 城市规划学刊, 2015(6):90-98.
YANG Junyan, SHI Yi. Approaches and methods of urban vertical control in overall urban design[J]. Urban Planning Forum, 2015(6):90-98.
- [12] 赖晓雪. 城市山体保护规划控制体系研究:以乌鲁木齐市山体保护规划为例[J]. 上海城市规划, 2017(3):69-76.
LAI Xiaoxue. Control system research of city mountain protection planning: A case study on mountain protection planning of Urumqi City[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2017(3):69-76.
- [13] 陈焯,魏小春. 解读英国城市景观控制规划:以伦敦圣保罗大教堂战略性眺望景观为例[J]. 国际城市规划, 2008(2):118-123.
CHEN Xuan, WEI Xiaochun. Read the urbanscape control plan in United Kingdom: Take strategic view landscape plan of St Paul's Cathedral as an example[J]. Urban Planning International, 2008(2):118-123.
- [14] 耿慧志,张书涵,杨春侠,等. “山-城”眺望景观的规划控制研究:以赣州市为例[J]. 城市规划, 2021, 45(10):95-109.
GENG Huizhi, ZHANG Shuhan, YANG Chunxia, et al. Research on “Mountain-City” view planning control: Taking Ganzhou as an example[J]. City Planning Review, 2021, 45(10):95-109.
- [15] 肖健,张若冰,曾胜,等. 全流域视角下的“两栖城市”规划设计策略:以深圳市深汕特别合作区赤石河为例[J]. 规划师, 2023 (5):103-110.
XIAO Jian, ZHANG Ruobing, ZENG Sheng, et al. Planning and design strategy of “Amphibious City” from the whole basin perspective: The example of Chishi River in Shenzhen-Shanwei Special Cooperation Zone[J]. Planners, 2023 (5):103-110.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)