

文章编号: 1671-6612 (2026) 03-446-07

冷水机组三种启停控制策略的 能耗对比与节能效果分析

徐梦轲¹ 徐永恒² 董宇航² 马子程² 周 沛¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院 合肥 230009;

2. 中建八局第一建设有限公司 济南 250100)

【摘 要】 空调系统能耗约占建筑总能耗的 60%，其中冷水机组作为空调系统的核心设备，其能耗占空调能耗的半数以上，因此对冷水机组的启停进行优化控制，在 Simulink 中完成建模后，以额定制冷量法启停策略为参考对照，并将其作为性能比较的基准，比较了 COP-PLR 曲线法和平均负载法两种方案在夏季运行一周的冷水机组启停情况和能耗大小，结果表明：相对于该基准 COP-PLR 曲线法运行一周后冷水机组能耗降低 1173.3kWh，节能率为 12.2%，总能耗降低 1716.1kWh，节能率为 16.1%；平均负载法运行一周后冷水机组能耗降低 1192.3kWh，节能率为 12.4%，总能耗降低 1816.2kWh，节能率为 16.6%。结论证实，所述两种优化策略具有显著的节能价值。

【关键词】 冷水机组；启停控制；COP；额定制冷量；平均负载

中图分类号 TU831.6 文献标志码 A

Optimization Control of Chiller Startup and Shutdown Based on Simulink

Xu Mengke¹ Xu Yongheng² Dong Yuhang² Ma Zicheng² Zhou Pei¹

(1.Hefei University of Technology, Hefei, 230009; 2.The First Company of China Eighth Engineering Bureau Ltd, Jinan, 250100)

【Abstract】 The energy consumption of the air-conditioning system accounts for about 60% of the total energy consumption of the building, and the chiller, as the core equipment of the air-conditioning system, accounts for more than half of the energy consumption of the air-conditioning. This study investigates energy-efficient on-off control strategies by developing a Simulink model. The rated cooling capacity method served as the benchmark, against which the COP-PLR curve method and the average load method were compared during a typical summer week. Simulation results showed significant energy savings was achieved compared with the benchmark. The COP-PLR curve method achieved chiller energy consumption reductions of 1173.3 kWh, with 12.2% of energy saving rate, the total energy consumption was reduced by 1716.1 kWh, and the energy saving rate was 16.1%. After one week of operation of the average load method, the energy consumption of the chiller was reduced by 1192.3 kWh, the energy saving rate was 12.4%, and the total energy consumption was reduced by 1816.2 kWh, and the energy saving rate was 16.6%. It is concluded that both optimized strategies offer substantial energy-saving potential.

【Keywords】 Chiller unit; Start-stop control; COP; Rated cooling capacity; Average load

0 引言

随着全球经济的飞速发展，能源消耗和环境问

题日益凸显。资料显示，供暖、通风和空调（HVAC）系统是当前社会建筑中最大的能源消耗者。对于一

作者简介：徐梦轲（2000.05-），女，硕士，E-mail: 1603232215@qq.com

通讯作者：周 沛（1983.05-），男，博士，副教授，E-mail: peizhou@hfut.edu.cn

收稿日期：2025-08-21

般办公楼,暖通空调系统能耗可占建筑总能耗的60%以上^[1],因此空调系统的节能优化至关重要。在暖通空调系统中,冷水机组作为核心制冷设备,其能耗通常占空调系统总能耗的较大比重,因此对冷水机组运行策略的研究,特别是启停策略的优化,对空调系统的节能优化有重要意义。

冷水机组的优化控制,是指在保证冷水机组能够提供足够冷量的同时,尽可能地降低空调系统的能耗,提高系统的运行效率^[2]。在空调系统设计过程中,为了满足建筑室内全年热舒适性,空调系统通常采用全负荷设计法,把全年最大冷负荷作为负荷指标,这种设计法使空调系统大部分时间都处于部分负荷状态,效率较低^[3]。而大部分的离心式冷水机组在负载率为70%~100%时拥有较高的运行效率^[4],因此冷水机组的优化控制通常是将冷水机组的运行负载率保持在这个区间内。但在多台冷水机组联合运行时,如何合理分配运行冷水机组的冷负荷以提高冷水机组的运行效率是空调系统节能的关键环节之一。

王香兰等^[5]以多冷水机组系统为研究对象,对系统采集的大量历史数据进行分析和处理,采用Apriori频繁项集算法,挖掘出在不同工况下各台冷水机组运行参数与最小运行能耗之间的关联规则,并提出了一种将粒子群算法与关联规则结合的负荷分配优化方法,最终使系统总能耗降低约12.5%;张旭豪等^[6]通过回归方程建立冷水机组性能系数(COP)与部分负荷率(PLR)之间的关系,利用遗传算法求出冷水机组能耗最优解,从而获得各冷水机组所承担的最优负荷比率,使系统全年节能率达到5.7%;Wang等^[7]利用冷水机组性能图对冷水机组的启停控制与负荷分配进行优化控制,并利用运行数据对冷水机组的性能图进行定期更新,进一步提高了控制策略的优化效果;Wang J等^[8]提出了一种改进的金豺优化算法(IGJO),在该算法的基础上,构建了一种结合冷水机组和热泵系统的模型预测优化框架,结果显示改进的金豺优化算法使设备的启停次数明显减小且系统总能耗降低12.8%;Li S等^[9]实施了一种面向冷水机组排序的数据驱动型模型预测控制法,同时开发了一种将动

态规划与两步优化方法相结合的方式,以加快冷水机组排序优化,结果表明所使用的MPC方法可使冷水机组的能源效率提高9.73%,同时降低了成本效益。

上述研究主要通过建立数学模型并运用智能算法进行在线优化,为冷水机组的节能运行提供了重要的理论方法和解决思路。然而,这类方法在实际工程应用中也面临挑战。首先,其优化效果高度依赖于模型的精准性,会导致固定模型与实际设备性能发生“失配”,从而使得算法的寻优精度降低。其次,复杂的在线优化算法对现场控制器的计算能力和稳定性要求较高,在实现上存在一定门槛。

针对上述不足,本文的研究路径并非追求复杂的在线优化算法,而是侧重于对已有明确物理意义、易于工程实现的启停控制策略进行能效评估。本文的创新之处在于:利用Simulink平台,构建了一个能够反映设备时变特性的合肥市某制冷机房精细化模型,通过模拟制冷季典型周的运行,系统地对比分析额定制冷量法、COP-PLR曲线法及平均负载法这三种启停控制策略的能耗水平。该方法旨在跳出复杂算法的框架,从实际可操作的控制策略中,识别出一种既高效节能又便于实施的策略,为实际机房的节能改造与运行管理提供一种更直接、可靠的参考依据。

1 空调系统的建模

本文采用MATLAB中的Simulink模块对合肥市某制冷机房的中央空调系统进行建模,主要包括冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵和冷却塔四部分。

1.1 冷水机组的建模

冷水机组是中央空调系统的主要能耗设备,其性能很大程度上决定了空调系统的能效^[10],冷水机组主要由蒸发器、压缩机、冷凝器、节能装置四大部件组成。根据设定制冷机房的每日空调开启时间为6:00~24:00(共18h),由于全年的冷负荷计算量较大,这里选取空调供冷季中比较具有代表性的一周时间(7月28日至8月3日)的空调开启时刻(共126h)的逐时负荷数据,利用绘图工具得到一周内空调开启时刻的负荷变化如图1所示。

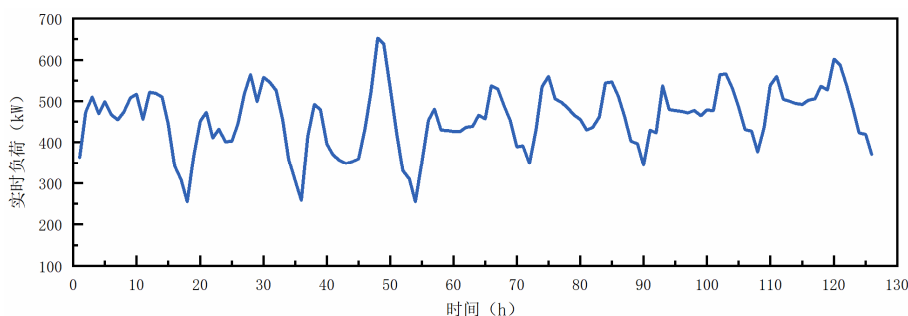


图1 一周内空调开启时刻的逐时冷负荷

Fig.1 The hourly load variations of air conditioning operations over a continuous week

其中最大冷负荷为 653kW, 考虑适当余量的 台, 具体的参数如表 1 所示。
情况下, 选用某品牌的离心式水冷磁悬浮机组两

表1 冷水机组参数表

Table 1 Parameter of the chiller unit

型号	制冷量		输入功率	COP	满液式蒸发器		壳管式冷凝器	
	kW	RT			水流量	水阻力	水流量	水阻力
LSBLX125/R4 (BP)	440	150	89	5.93	91	54	113	46

首先基于厂家提供的水冷机组变工况修正系数表, 总结得出该离心式水冷磁悬浮机组的(COP,

PLR) 数据对, 并在 MATLAB 软件中拟合出 COP-PLR 之间的关系曲线, 如图 2 所示。

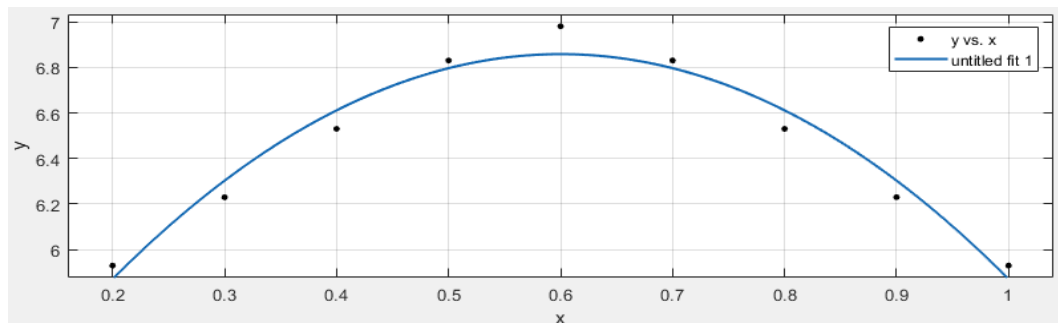


图2 COP-PLR 拟合曲线

Fig.2 COP-PLR fitting curve

MATLAB 窗口中得到的数据分别为 $P_1 = -6.494$; $P_2 = 7.792$; $P_3 = 4.559$, 其中 $R\text{-square}=0.9276$, 均方差 $RMSE=0.1299$, 精度较高, 满足工程需要, 能够较好地表达机组 COP 与 PLR 之间的变化关系, 因此 COP 与 PLR 之间的关系曲线可表示为:

$$COP = -6.494PLR^2 + 7.792PLR + 4.559 \quad (1)$$

根据相关知识, 冷水机组的耗功率可表示为^[11]:

$$W1 = \frac{Q}{COP} \quad (2)$$

因此, 可以在 Simulink 中逐步建模、连线, 得到离心式水冷机组能耗仿真模型。

1.2 冷冻水泵建模

冷冻水泵是冷冻水循环系统中不可或缺的一部分, 经过冷水机组换热后的冷冻水在冷冻水泵的加压作用下流入冷冻水管道, 最终输送到各个末端设备, 通过热交换吸收室内的热量, 使室内温度降低, 然后温度升高的冷冻水再返回冷水机组进行冷却, 如此循环往复, 以维持室内的舒适度。为了简化考虑, 忽略冷冻水循环管道的能量损失, 假定冷冻水流量理想不变, 冷冻水泵的能耗受到冷冻水流量、工作的实际扬程等因素影响, 需要先根据机组制冷负荷确定冷冻水泵实际工作时的流量和扬程^[12]:

冷冻水泵的流量 G_e 可由式 (3) 确定:

$$G_e = \frac{Q}{\rho c(t_{e1} - t_{e2})} \quad (3)$$

确定冷冻水泵流量 G_e 以后, 可得到冷冻水泵实际工作扬程 H_e :

$$H_e = H_{e0} \left(\frac{G_e}{G_{e0}} \right)^2 \quad (4)$$

冷冻水泵的能耗 W_2 可以通过含 G_e 、 H_e 的表达式计算得到:

$$W_2 = \beta_1 \beta_2 \frac{G_e H_e}{\eta_e} \quad (5)$$

根据所选的离心式冷水机组的满液式蒸发器水流量即为冷冻水额定流量, 并考虑适当余量的情况下, 按额定流量的 110% 计^[13], 选择某品牌 SLW 系列卧式单级单吸变频离心泵, 详细参数如表 2 所示。

表 2 SLW80-125 型冷冻水泵参数表

Table 2 Parameters of the chilled water pump

型号	额定流量 m ³ /h	扬程 L/s	电机功率 m	转速 kW	转速 r/min
SLW80-125(I)	100	27.8	20	11	2950

冷冻水泵型号选定后, 建模所需的相关参数已得知, 另取 $\beta_2 = 1.15$ 、 $\eta_e = 0.80$, 冷冻水进出口温度按额定工况下的数值输入。在 Simulink 中逐步建模、连线, 可得到冷冻水泵的能耗仿真模型。

1.3 冷却水泵建模

冷却水泵的能耗数学模型可类比冷冻水泵, 变流量工作时冷冻水泵的流量和工作扬程的数学表达式如式 (6) (7) 所示。

$$G_c = \frac{Q_L}{\rho c(t_{c2} - t_{c1})} \quad (6)$$

$$H_c = H_{c0} \left(\frac{G_c}{G_{c0}} \right)^2 \quad (7)$$

式中: Q_L 为冷水机组冷凝器负荷, kW。

根据相关资料^[14], Q_L 与冷水机组制冷量 Q 的关系可表示为 $Q_L = A_L Q$, 通常 A_L 为大于 1 的常数, 一般冷凝温度越高、蒸发温度越低, 其数值越大, 这里取 $A_L = 1.20$ 。

同样的, 冷却水泵的能耗 W_3 可以表示为:

$$W_3 = \beta_1 \beta_2 \frac{G_c H_c}{\eta_c} \quad (8)$$

根据所选离心式水冷机组的壳管式冷凝器水流量即冷却水额定流量, 并考虑适当余量的情况下, 按额定流量的 110% 计^[13], 选择某品牌 SLW 系列卧式单级单吸变频离心泵, 详细参数如表 3 所示。

表 3 SLW80-160 型冷却水泵参数表

Table 3 Parameters of the cooling water pump

型号	额定流量 m ³ /h	扬程 L/s	电机功率 m	转速 kW	转速 r/min
SLW80-160	130	36.1	24	15	2950

冷冻水泵型号选定后, 所需的相关参数已得知, 另取 $\beta_2 = 1.15$ 、 $\eta_c = 0.80$, 冷却水进出口温度暂取额定工况下的数值输入。在 Simulink 中逐步建模、连线, 可得到冷却水泵能耗仿真模型。

1.4 冷却塔建模

冷却塔是利用水与空气的充分接触, 通过蒸发散热, 使部分水蒸发吸热来降低剩余水的温度, 同时借助接触传热, 依靠水和空气的温度差, 将水中热量传导给空气, 以实现对水的冷却的装置。冷却塔的工作原理一般较为复杂, 常见的传热方式有蒸发散热、对流传热和辐射传热。本工程采用的冷却塔的风机类型为变频风机, 其能耗特点类似于变频水泵。为了简便计算, 有学者提出多项式拟合的方法计算冷却塔风机的能耗, 并收集了大量冷却塔运行时的样本数据, 得到了冷却塔运行能耗与冷却水流量的关系式。冷却塔能耗的数学模型可以通过式 (9) 表达^[15]。

$$W_4 = 69.8978 G_c^2 + 83.7279 G_c + 0.1554 \quad (9)$$

式 (9) 将冷却塔与冷却水泵的运行情况进行关联, 将冷却塔的能耗用含冷却水泵实际工作流量的二次方程表达, 保证了精度的同时简化了计算。所选的冷却塔的基本参数如表 4 所示。

表 4 SFB-175SL 型冷却塔参数

Table 4 Parameters of the cooling tower

型号	风机类型	冷却水量 m ³ /h	电机功率 kW	冷却水进塔扬程 mH ₂ O
SFB-175SL	变频风机	175	7.5	4.5

冷却水的实际流量可以通过冷却水泵的相关数学模型计算得到, 从而可以在 Simulink 里建模、连线, 得到冷却塔的能耗仿真模型。

2 冷水机组的启停策略

本文为了降低制冷系统的整体能耗、达到节能的效果,考虑从冷水机组的启停状况进行控制,主要考虑三种启停方案。

方案一:额定制冷量法(作为参考对照),该方法使用两台同种型号的冷水机组,当系统开始运行时,首先开启第一台冷水机组,根据当前时刻的冷负荷使系统进行判断,若冷负荷低于机组的额定制冷量,仅开启第一台冷水机组,若冷负荷高于机组的额定制冷量,同时开启两台冷水机组,第一台冷水机组按额定制冷量运行,第二台承担剩余的负荷;

方案二: COP-PLR 曲线法,冷水机组的性能特性主要指其能效比 COP 与部分负荷率 PLR 之间的关系^[16],研究表明系统的运行能效比(EER)与 PLR 相关的同时,还与冷却水的出水温度相关^[17]。因此在冷水机组启停控制时需要考虑特定情况下的 COP-PLR 曲线。由选取的冷水机组的

COP-PLR 曲线可知,该型号机组在负荷率为 60% 时机组的 COP 达到最大,此时系统的功率最小、节能效果最好,因此该方法使用两台同型号冷水机组,当系统开始运行时,首先开启第一台冷水机组,根据当前时刻的冷负荷进行判断,若冷负荷小于机组额定制冷量的 60%,则仅开启第一台机组,若冷负荷大于机组额定制冷量的 60%,则开启第二台机组,并由其承担剩余部分的冷负荷;

方案三:平均负载法,该方法使用两台同种型号的冷水机组,并且同步启停,系统根据当前运行时刻的冷负荷量将负荷平均分配给两台冷水机组。

为了更好地比较三种启停策略的节能效果,首先考虑对比三种方案的冷水机组实时启停情况。本系统以合肥市某制冷机房为参考,主要考虑空调制冷季最具代表性的一周时间(7月28日~8月3日)的空调开启时刻(6:00~24:00,共18h)的运行情况,三种方案冷水机组的启停情况如图3所示。

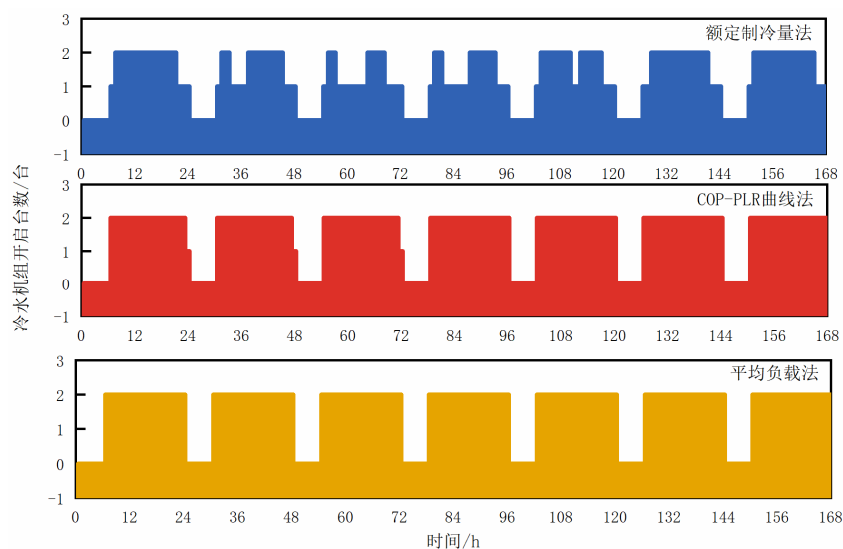


图3 冷水机组开启台数对比

Fig.3 Comparison of the number of cooling units activated

由图3可以看出方案一的冷水机组开启台数情况比较多变,且和其他两组差异性较大,方案二和方案三的冷水机组开启台数情况几乎相同,仅有三个点存在差异,但具体的运行结果还应多方面综合考虑。因此下面考虑三种方案运行一周后冷水机组的能耗变化情况。

3 运行结果分析

前文已经讨论了三种方案运行一周的冷水机

组启停情况,作为对照基准的额定制冷量法中冷水机组存在较为频繁的启停,这不仅会造成显著的能源浪费,还会对压缩机等核心部件产生不可逆的机械与电气冲击,缩短设备寿命,同时引起供水温度波动,降低系统控制的稳定性与室内热舒适性。

为了进一步对三种启停策略进行比较,下面对运行一周内冷水机组的功率变化情况进行对比分析,如图4所示。

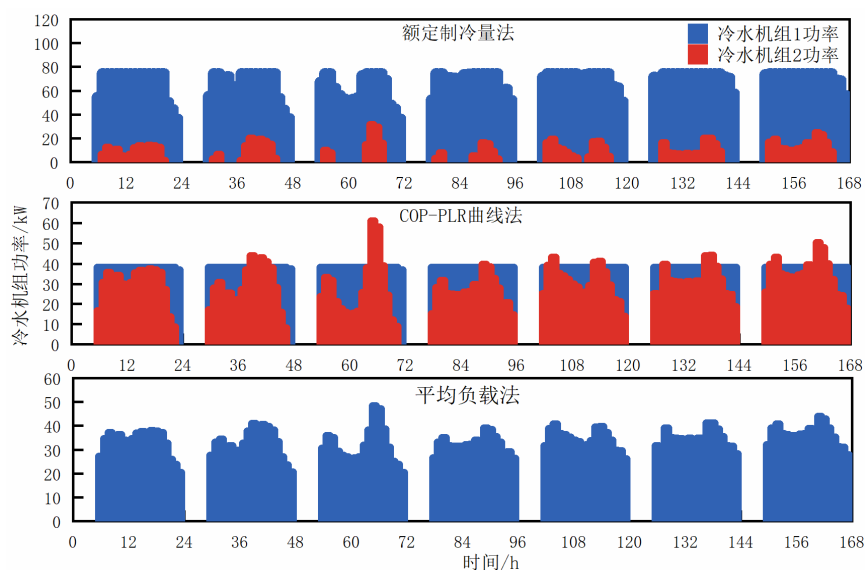


图 4 冷水机组功率对比

Fig.4 Comparison of chiller unit power.

由图 4 可以看出方案一中冷水机组 1 几乎大部分时间都处于满负荷运行状态, 而冷水机组 2 所承担的负荷很少。由该机组的 COP-PLR 曲线可知, 机组满负荷运行时 COP 较低, 因此这种方案会导致冷水机组 1 大部分时间都处于高能耗状态, 不利用系统的节能; 方案二的 COP-PLR 曲线法中的冷水机组 1 大部分时刻都在 60% 负载率状态下运行, 此时机组的 COP 最大, 能耗最低, 同时机组 2 的负载率也都普遍不高, 因此这种方法的能耗较低、节能效果较好。方案三的平均负载法中两台冷水机

组同一时刻的负载率相同, 且由图 4 可以看出平均负载法机组的功率和 COP-PLR 曲线法的功率较为接近, 几乎都在负载率为 60% 左右运行, 因此这种方法的能耗也较低、节能效果较好, 但此处只说明了冷水机组的运行功率, 想要更好地比较方案的节能效果, 还应进一步探讨整个机组的能耗状况。

同时为了比较三种策略的节能效果, 下面将三种运行方案运行一周后冷水机组的能耗及系统的总能耗进行对比, 如图 5 所示。

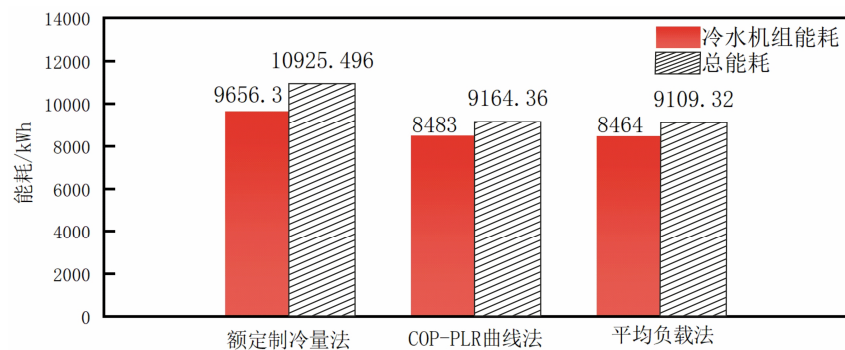


图 5 三种方案能耗对比

Fig.5 Comparison of energy consumption among three plans

由图 5 的数据可知, 方案一的额定制冷量法系统运行一周后冷水机组及系统的总能耗最大, 方案二的 COP-PLR 曲线法和方案三的平均负载法系统运行一周后冷水机组及系统的总能耗都降低了, 且能耗值较为接近。其中方案二的 COP-PLR 曲线法

运行一周后冷水机组的能耗降低 1173.3kWh, 节能率为 12.2%, 系统的总能耗降低 1716.136 kWh, 节能率为 16.1%; 方案三的平均负载法运行一周后冷水机组的能耗降低 1192.3kWh, 节能率为 12.4%, 系统的总能耗降低 1816.176 kWh, 节能率为

16.6%。

因此,无论是采用方案二的 COP-PLR 曲线法还是方案三的平均负载法,和方案一相比系统运行一周后冷水机组的能耗及系统的总能耗均降低,且节能率比较接近,都在 16%左右,节能效果较好。

4 结果展望

本文旨在从冷水机组的启停对制冷系统进行节能控制,首先在 MATLAB 中的 Simulink 模块对制冷系统进行建模,然后以额定制冷量法作为参考,比较了 COP-PLR 曲线法和平均负载法的节能效果,具体结论为:

(1) 额定制冷量法冷水机组的开启台数较为多变,COP-PLR 曲线法和平均负载法的冷水机组开启台数几乎同步,仅有 3 个数据点存在差异;

(2) 运行一周冷水机组的功率变化情况表明,额定制冷量法中冷水机组 1 的大部分时间需要满负荷运行,此时机组的 COP 较低,耗能高;而 COP-PLR 曲线法和平均负载法的冷水机组负荷大部分都维持在机组的最佳 COP 点附近,此时系统的能耗最低、节能效果最好;

(3) 通过对比三种控制策略运行一周后冷水机组的能耗及系统的总能耗可以看出: COP-PLR 曲线法运行一周后冷水机组节能 12.2%,系统的总能耗节能 16.1%;平均负载法运行一周后冷水机组节能 12.4%,系统的总能耗节能 16.6%。两种方案节能效果均表现良好且较为接近,其主要原因有:①系统运行一周内冷负荷的大小在平均分配后与机组的最大 COP 点的负荷量较为接近,存在偶然性;②两种运行策略的开启台数情况几乎同步,只有 3h 存在差异,不具有代表性。因此在实际工程中具体使用哪种方案可以采用不同的负荷数据进行几次对比研究。

参考文献:

[1] Wu H, Li W, Jiang C, et al. Study on energy consumption prediction method of air-conditioning system from the perspective of indoor environmental parameters by using Elman neural network[J]. Energy,

2025,335:138012.

- [2] 宁玉飘.基于运行数据的冷水机组系统优化控制研究[D].上海:上海交通大学,2020.
- [3] 薛殿华.空气调节[M].北京:清华大学出版社,1990.
- [4] 李颀.基于性能曲线的冷水机组配置和运行优化[J].制冷,2012,31(2):10-16.
- [5] 王香兰,晋欣桥,吕远,等.基于关联规则的多冷水机组系统负荷优化分配[J].制冷学报,2022,43(1):35-45.
- [6] 张旭豪,晋欣桥,杜志敏,等.基于遗传算法的冷水机组运行优化策略研究[J].建筑热能通风空调,2011,30(3):15-18.
- [7] Wang Y, Jin X, Du Z, et al. Evaluation of operation performance of a multi-chiller system using a data-based chiller model[J]. Energy and Buildings, 2018,172:1-9.
- [8] Wang J, Wei Z, Yin Y, et al. Optimal control of parallel combination of heat pump and chiller system based on an improved golden jackal optimization[J]. Energy, 2025,334.
- [9] Li S, Li S, Wang Z. Accelerating chiller sequencing using dynamic programming[J]. Energy and Buildings, 2024,325.
- [10] Yu F W, Chan K T. Strategy for designing more energy efficient chiller plants serving air-conditioned buildings[J]. Building and Environment, 2007,42(10):3737-3746.
- [11] 陆亚俊.建筑冷热源(第2版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [12] 郭朝辉,石佳磊,牛思佳.中央空调制冷系统运行优化模型及实例分析[J].粉煤灰综合利用,2020,34(1):104-108.
- [13] 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.
- [14] 方厚枢.建筑和建筑设备的节能-设计、管理技术的基础和应用[M].北京:中国出版年鉴社,1992.
- [15] 龙惟定,王盛卫.适于系统仿真的冷却塔模型及其实验验证[J].暖通空调,2004,(7):1-5.
- [16] 黄俊杰,梁彩华,何慧,等.基于主动水蓄冷的冷水机组节能优化策略研究[J].制冷学报,2025,46(1):108-115.
- [17] 陈文凭,杨昌智,余院生.基于冷水机组性能曲线的中央空调水系统优化控制[J].流体机械,2008,(8):73-78.