

文章编号:0253-4339(2021)05-0064-09
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.05.064

集中空调水系统节能优化策略及仿真研究

范新舟 姚 晔

(上海交通大学机械与动力工程学院 制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 公共建筑集中空调水系统能耗占建筑总能耗比例较高,各设备的合理启停及控制参数的优化设置在系统节能中起到了关键作用。本文在满足末端冷负荷的前提下,以系统总能耗最小为目标,提出了冷水机组、水泵启停优化策略及控制参数全局优化方法。以冷冻水供水温度、冷却水流量作为独立优化控制参数建立集中空调水系统能耗模型。以某建筑为例,利用 DeST 软件模拟了建筑空调负荷变化,对所提出的优化方法进行了验证,结果表明:在负荷率 5%~100% 变化范围内,冷水机组平均 COP 提高了 10.9%,平均节省能耗 8.9%,水泵平均节省能耗 18.6%;在夏季典型日,集中空调水系统平均节省能耗 20.4%。

关键词 集中式空调系统;水系统;节能;优化

中图分类号:TU831.3

文献标识码:A

Study on Energy-saving Optimization Strategy and Simulation of Central Air-conditioning Water System

Fan Xinzhou Yao Ye

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract The energy consumption of central air-conditioning water systems in public buildings accounts for a high proportion of their total energy consumption. The optimal start and stop strategy for each device and the settings of the control parameters play a key role in the system energy saving. In this study, a start-stop optimization strategy for the chiller and water pump and the global optimization method for the control parameters is proposed while aiming to satisfy the terminal cooling load and to minimize the total energy consumption of the system. The chilled water supply temperature and cooling water flow were considered as independent control parameters, and an energy consumption model of the central air-conditioning water system was established. The change in cooling load in one example building was simulated using DeST software, and the proposed optimization method was verified. The results indicate that the average coefficient of performance of the chiller was improved by 10.9%, the average energy consumption was reduced by 8.9%, and the average energy consumption of the water pump was reduced by 18.6% within the load rate range of 5% to 100%. On typical summer days, the central air-conditioning water system saves energy consumption by 20.4% on average.

Keywords central air-conditioning system; water system; energy-saving; optimization

建筑节能是我国实现 2030 年碳减排目标的关键领域。对于写字楼、酒店、车站、商场等大型公共建筑,空调系统能耗占建筑总能耗的 40%~60% 以上^[1],水系统(包括冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔)能耗占空调系统总能耗的 60%~80%^[2]。因此,集中空调水系统对于空调系统的节能,以及建筑节能起到关键作用。

集中空调水系统节能通常通过冷水机组负荷分配优化和控制参数优化实现^[3-5]。刘兆辉等^[6]提出了空气源热泵序列优化控制策略,采用平均分配负荷的方式,实现了在不同负荷下针对同型号机组的最佳

运行序列优化控制。闫军威等^[7]提出了基于遗传算法的多台冷水机组负荷分配优化方法,通过优化得到的机组负荷再进行供水温度的控制。Liu Zhaohui 等^[8]基于冷负荷曲线、冷水机组和冷却塔模型,采用分枝定界算法,得到了冷水机组序列优化控制策略,机组能耗相比于传统策略明显降低。Qiu Shunian 等^[9]提出了基于强化学习 Q-learning 方法的冷水机组负荷最优分配方法,以 COP 作为环境反馈,通过调节冷冻水出口温度的设定值来自主学习和优化冷水机组负荷,达到了 4.95% 节能率的效果。F. Sohrabi 等^[10]提出了基于交易市场算法的最优冷水机组负荷

分配方法,以每台冷水机组的部分负荷率作为决策变量,以满足冷负荷需求前提下能效最小为目标,其收敛速度和优化节能率较其他方法大大提高。陈鑫^[11]以冷冻水供水温度及冷却水供水温度作为独立控制参数,使用遗传算法得到最佳控制参数。Zhuang Luping 等^[12]提出了使用分层进化算法的集中空调水系统节能优化,通过优化冷冻水供回水温差及水泵频率实现系统总能耗最小。Deng Jiewen 等^[13]对冷冻水系统进行节能优化,得到冷冻水供回水大温差有利于节能的结论。

然而,上述研究忽略了集中空调水系统中不同设备之间的耦合,一个或几个设备的最优控制策略对于整个集中空调水系统可能不是最优的。针对上述问题,本文提出一种新的集中空调水系统全局优化策略,包括冷水机组启停优化策略和水泵启停优化策略,以冷冻水供水温度及冷却水流量作为独立全局优化控制参数。以广州市的一栋医院建筑为案例,对集中空调水系统进行了建模模拟及优化仿真,研究在满足空调区域舒适度的前提下,集中空调水系统的最优控制策略和最佳控制参数,并对优化策略与传统策略下的各设备能耗与系统总体能耗进行对比,以验证优化策略的节能潜力。

1 系统建模

集中空调水系统是一个复杂而又集成度高的系统,各设备之间既可独立工作又相互联系紧密。系统能耗模型以个设备能耗总和为目标函数。

$$P_{\text{total}} = \sum P_{\text{Chiller},i} + \sum P_{\text{ChilledPump},j} + \sum P_{\text{CoolingPump},k} + \sum P_{\text{CoolingTower},l} \quad (1)$$

式中: P_{total} 为集中空调水系统总能耗,kW; $P_{\text{Chiller},i}$ 为各台冷水机组能耗,kW; $P_{\text{ChilledPump},j}$ 为各台冷冻水泵能耗,kW; $P_{\text{CoolingPump},k}$ 为各台冷却水泵能耗,kW; $P_{\text{CoolingTower},l}$ 为各台冷却塔能耗,kW。

1.1 冷水机组建模

YE 冷水机组模型是一种多元灰箱模型,与其他模型相比,该模型无需考虑机组类型,兼顾冷水机组的实际运行状态(不同蒸发冷凝温度、负荷率等),在计算冷水机组能效比方面,具有更高的准确性。当冷水机组处于不同运行状态时,该模型用待拟合系数 a_1 、 a_2 对模型进行修正^[14]。YE 冷水机组模型:

$$\text{COP} = \frac{r}{\left(\frac{T_c}{T_e} - 1\right)r + a_1 \frac{T_c}{T_e} - a_2} \quad (2)$$

式中: r 为冷水机组的实时负荷率, $r = \frac{Q_e}{Q_0}$; Q_e 为

冷水机组实时冷负荷,kW; Q_0 为冷水机组额定冷负荷,kW; T_e 、 T_c 分别为冷水机组蒸发温度和冷凝温度,K。

由于不同冷水机组的功能不同,有些设备无法准确测量蒸发温度及冷凝温度,可通过冷冻水、冷却水回水温度及流量计算蒸发、冷凝温度。

蒸发温度模型:

$$T_e = T_{w,e,E} - \frac{Q_e}{c_w G_{w,e} \left(1 - e^{-\frac{UA_e}{c_w G_{w,e}}}\right)} \quad (3)$$

式中: $T_{w,e,E}$ 为冷冻水回水温度,K; c_w 为水的比热容,kJ/(kg·K); $G_{w,e}$ 为冷冻水质量流量,kg/s; UA_e 为蒸发器的总传热系数,W/K。

冷凝温度模型:

$$T_c = T_{w,c,E} + \frac{Q_c}{c_w G_{w,c} \left(1 - e^{-\frac{UA_c}{c_w G_{w,c}}}\right)} \quad (4)$$

式中: $T_{w,c,E}$ 为冷却水回水温度,K; $G_{w,c}$ 为冷却水质量流量,kJ/(kg·K); UA_c 为冷凝器总传热系数,W/K。

冷水机组能耗 P_{chill} (kW)由式(5)计算:

$$P_{\text{chill}} = \frac{Q_e}{\text{COP}} \quad (5)$$

1.2 水泵建模

水泵能耗模型:

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho_w g H G_w}{\eta_p \eta_m \eta_f} \quad (6)$$

式中: ρ_w 为水的密度,kg/m³; g 为当地重力加速度,m/s²; H 为扬程,m; G_w 为水流的体积流量,m³/s; η_p 为水泵效率; η_m 为电机效率; η_f 为变频器效率。

水泵的性能曲线表明,水泵扬程、效率皆与流量有关,即扬程与效率均可由流量表示,因此,式(6)可改写为:

$$P_{\text{pump}} = b_0 + b_1 G_w + b_2 G_w^2 \quad (7)$$

式中: b_i ($i=0,1,2$)为待拟合系数,由实际的设备运行数据拟合得到。

1.3 冷却塔建模

集中空调运行过程中,一般采取冷却水泵与冷却塔按比例启停的控制方式,冷却塔为定频,冷却塔风机在运行过程中风量始终为额定值,因此冷却塔能耗是其额定功率。

$$P_{\text{CoolingTower}} = P_{\text{CoolingTower, rated}} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{CoolingTower, rated}}$ 为每台冷却塔的额定功率,kW。

2 优化策略

2.1 冷水机组启停优化策略

传统的冷水机组启停策略是按照开启机组累计额定负荷能满足实际冷负荷需求下,以最小开启台数进行选择。对于相同额定功率的冷水机组,负荷采用平均分配的方式;而对于不同额定功率的冷水机组,负荷采用相同负荷率的分配方式。但由式(2)可知,冷水机组的能效比 COP 与负荷率有关,且并不是在负荷率最大的时候 COP 最高^[14]。同时,在冷水机组的实际运行过程中,不同运行工况(冷冻水、冷却水进出口温度变化)对 COP 影响很大。因此,上述两种分配方式存在开启的冷水机组很难处于最佳能效比状态的问题。

本文提出一种新的负荷分配方式:在满足冷负荷的前提下,采取不平均分配方式,使得尽可能多的开启冷水机组处于最佳 COP 状态,以提高冷水机组效率,降低能耗。根据冷水机组的性能曲线,可知每台冷水机组的最佳负荷率,计算出对应的冷负荷。当冷负荷一定时,一部分开启机组处于最佳冷负荷状态,剩余冷负荷由剩余开启机组按照相同的负荷率进行分配。

定义 rS 为开启冷水机组实际负荷率对应于最佳负荷率之差的平方平均数,如式(9)所示。 rS 越小,代表开启冷水机组采用当前负荷分配情况下,整体机组效率越高; rS 越大,整体机组效率越低。

$$rS = \frac{\sum_{i=1}^n (r_{best,i} - r_{act,i})^2}{n}$$

(9)

冷水机组启停优化策略计算流程如图 1 所示。当多台冷水机组并联运行时,利用优化策略可以获得各台冷水机组启停策略及开启机组最佳负荷,以保证机组获得整体最佳 COP。

2.2 水泵启停优化策略

传统的水泵启停策略是按照满足实际水流量,最小开启台数进行设定。水泵效率最高点位于部分负荷状态下,因此水泵开启台数的优化策略为:在满足水流量的前提下,使所有开启的水泵尽可能运行在高效率状态,以减少水泵的能耗。

目标函数为:

$$P_{\text{Pump}} = \min \sum_{i=1}^n P_{\text{Pump},i}(G_{w,i})$$
$$\text{s.t. } G_w = \sum_{i=1}^n G_{w,i}$$
$$G_{w,i,\min} \leq G_{w,i} \leq G_{w,i,\max}$$

(10)

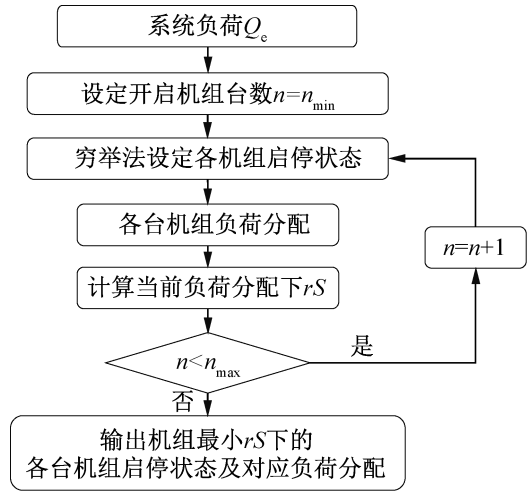


图 1 冷水机组启停优化策略
Fig.1 Optimal strategy for start and stop of chiller

式中: $G_{w,i,\min}$ 、 $G_{w,i,\max}$ 分别为水泵运行流量的上下限, m^3/h 。

水泵启停优化策略计算流程如图 2 所示。当多台水泵并联运行时,利用优化策略可以获得各台水泵启停最佳策略,以保证在满足水流量的前提下,水泵整体能耗最小。

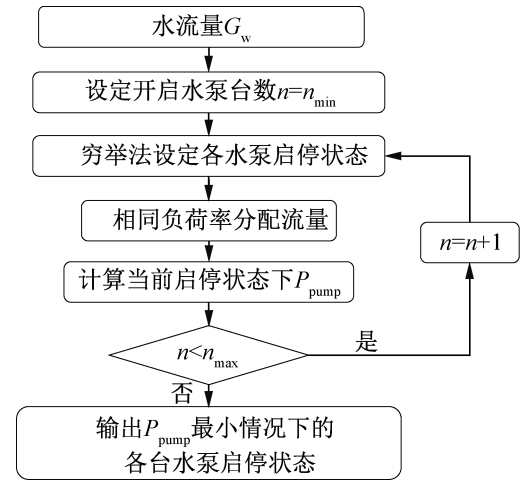


图 2 水泵启停优化策略
Fig.2 Optimal strategy for start and stop of pump

2.3 系统优化参数确定

集中空调水系统是一个错综复杂,耦合性很强的系统,由于其强耦合性,在优化过程中,容易出现“维数灾”,导致控制系统崩溃。因此,本文根据集中空调水系统的特点,按照先冷冻水系统后冷却水系统的顺序进行优化。

对于冷冻水系统而言,用能设备包括冷水机组及冷冻水泵。冷冻水回水温度会根据实际负荷的变化而产生波动,是不可控量,而冷冻水供水温度可通过

系统底层 PLC 进行实际控制,为可控量,因而作为冷冻水系统的优化参数。冷冻水系统优化目标为:在一定的冷负荷下,寻找最佳冷冻水供水温度及各冷冻水泵的最佳流量(开启频率),使所有冷冻水泵与冷水机组能耗最小。

对于冷却水系统,用能设备包括冷却水泵及冷却塔。冷却水供回水温度不仅受设备本身性能的影响,

还受实时天气情况的影响,无法通过底层 PLC 进行直接控制,而冷却水流量可通过冷却水泵的启停和频率进行控制,为可控量,因而作为冷却水系统的优化参数。

集中空调水系统优化过程如图 3 所示。 t 为环境温度,℃;RH 为环境湿度。

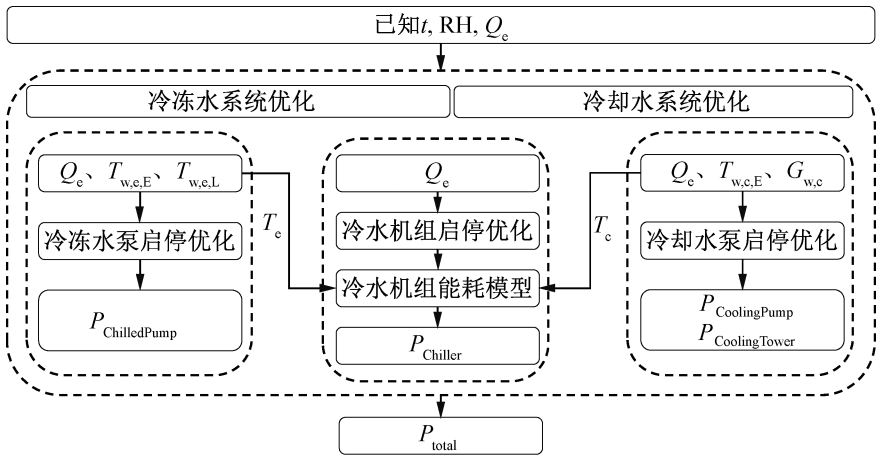


图 3 集中空调水系统优化过程

Fig.3 Optimization process of central air-conditioning water system

3 实例验证

3.1 空调系统及负荷模拟

本文研究了一栋位于广东省广州市的综合性医院的空调系统,原理如图 4 所示。大楼共 18 层,地上 15 层,地下 3 层,主要建筑功能为候诊大厅、药房、病房等。空调系统的冷源采用 2 台制冷量为 2 461 kW 的水冷离心式冷水机组和 1 台制冷量为 1 406 kW 的水冷螺杆式冷水机组,额定功率分别为 451 kW 和

287 kW,输配系统采用 3 台额定功率为 75 kW(两用一备)和两台额定功率为 45 kW(一用一备)的变频冷冻水泵,额定流量分别为 480 m³/h 和 270 m³/h,以及 3 台额定功率为 75 kW(两用一备)和 2 台额定功率为 37 kW(一用一备)的变频冷却水泵,额定流量分别为 580 m³/h 和 320 m³/h,并附有 2 台额定功率为 37 kW 和 1 台额定功率为 22 kW 的横流式冷却塔。

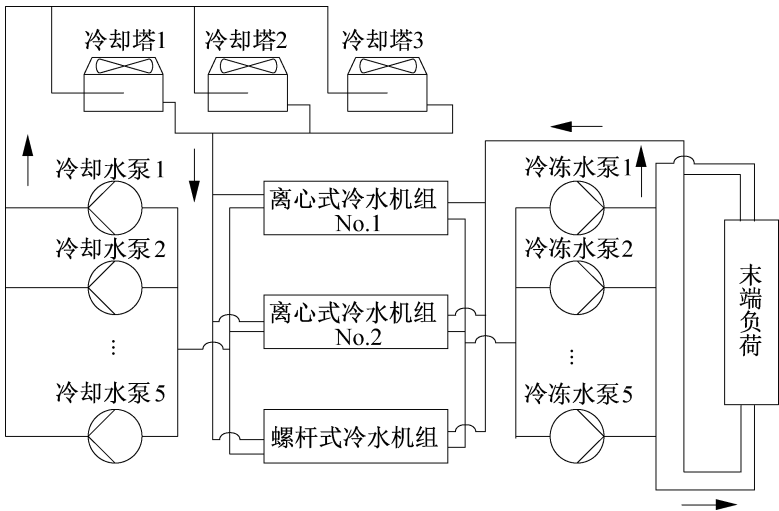


图 4 集中空调水系统原理

Fig.4 Principles of air-conditioning water system

利用 DeST 软件,对建筑进行建模,并对建筑夏季冷负荷(6月1日 00:00—9月30日 23:59)进行了模拟计算,计算结果如图 5 所示。由图 5 可知,夏季建筑冷负荷最大为 2 394 kW,平均冷负荷为1 040 kW。

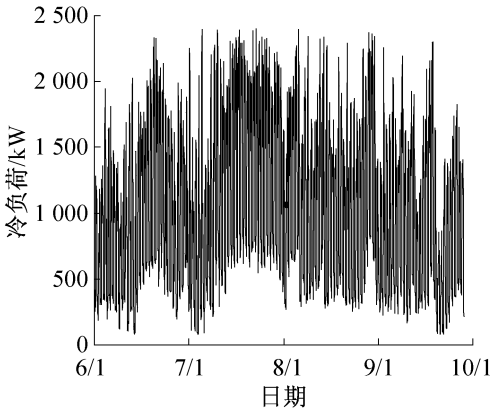


图 5 建筑逐时负荷
Fig.5 Hourly loads of building

3.2 不同负荷下冷水机组启停优化策略性能对比

为对比空调系统在不同负荷下两种冷水机组开启策略的性能,根据冷水机组历史运行数据,使用最小二乘法对模型参数进行拟合,结果如表 1 所示。

表 1 冷水机组模型参数
Tab.1 The model parameters of chiller

	a_1	a_2
离心式冷水机组 No.1	0.187 9	0.152 0
离心式冷水机组 No.2	0.173 4	0.119 2
螺杆式冷水机组	0.149 0	0.108 0

在系统设定控制参数不变(冷冻水供水温度和冷却水流量)及除机组外其他设备启停状态相同的情况下,计算了不同负荷率下冷水机组开启情况及冷源系统总体 COP。以冷水机组总额定负荷作为满负荷,假设集中空调水系统在不同的负荷率下运行。传统策略下,以满足最大冷负荷需求设置冷水机组开启状态,根据负荷的变化优先开启大冷量冷水机组。图 6、图 7 所示分别为两种策略下(传统策略和优化策略)冷水机组运行台数以及冷源系统总体 COP 的对比。

结果表明:优化策略下冷水机组开启台数相比于传统策略有所增加,这是因为优化策略以增加开启机组台数来避免开启机组的负荷率过高,使其运行在更

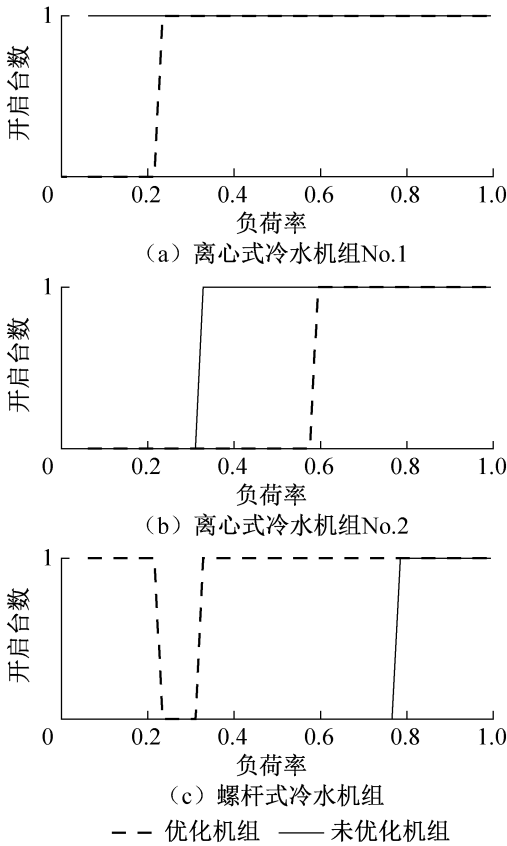


图 6 两种策略下冷水机组运行台数对比
Fig.6 Contrast of operating chiller number of two strategies

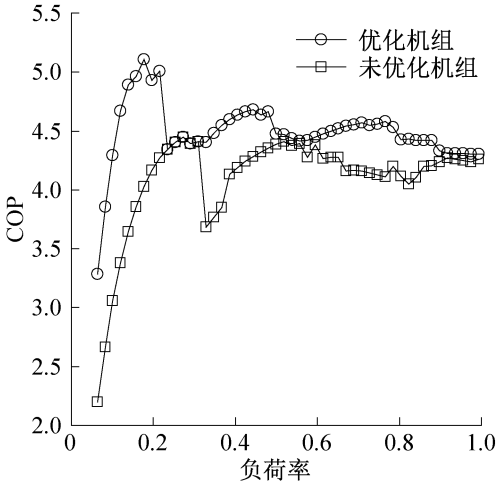


图 7 两种策略下冷源系统总体 COP 对比
Fig.7 Contrast of COP of cold source of two strategies

高的 COP 状态。优化策略下冷源系统总体 COP 更高,在负荷率 5%~100%变化范围内,冷源系统平均 COP 提高了 10.9%,平均节能能耗 8.9%。

3.3 不同负荷下水泵启停优化策略性能对比

为对比空调系统在不同负荷下两种水泵开启策略的性能,根据水泵历史运行数据,使用最小二乘法对模型参数进行拟合,结果如表 2 所示。

表 2 水泵模型参数

Tab.2 The model parameters of water pump

	b_0	b_1	b_2
冷冻水泵 (75 kW)	46.090 116	-0.043 925	0.000 216
冷冻水泵 (45 kW)	22.636 130	0.017 650	0.000 271
冷却水泵 (75 kW)	42.764 071	-0.015 031	0.000 116
冷却水泵 (37 kW)	18.641 910	0.012 265	0.000 125

在系统设定控制参数不变(冷冻水供水温度和冷却水流量)及除水泵外其他设备启停相同的情况下,计算不同负荷下水泵开启情况及水泵总能耗。

图 8 所示为两种策略下水泵开启情况对比,优化策略下冷冻水泵和冷却水泵的开启台数相比于传统策略有所减少,这是因为优化策略下,开启了大额定流量的水泵以代替传统策略下开启两台小流量水泵,使水泵运行效率更高。两种策略下水泵总能耗对比如图 9 所示,优化策略下水泵的总能耗更低,在负荷率 5%~100%变化范围内,水泵平均节省能耗 18.6%。

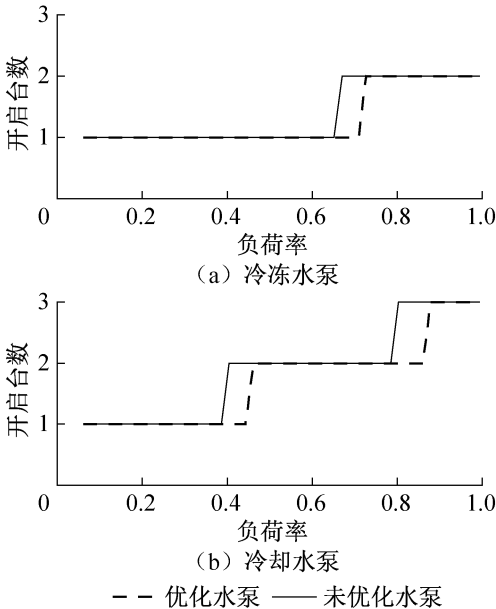


图 8 两种策略下水泵运行台数对比

Fig.8 Contrast of operating water pump number of two strategies

3.4 不同负荷下参数优化性能对比

为了对比空调系统在不同负荷下系统控制参数优化的性能,在系统各设备启停相同的情况下,计算不同负荷下系统供水温度优化值、冷却水流量

优化值及相应的系统总能耗、各设备总能耗。未优化策略下,冷冻水供水温度始终设置为 7℃,冷却水流量按照固定冷却水供回水温差为 6℃设置。

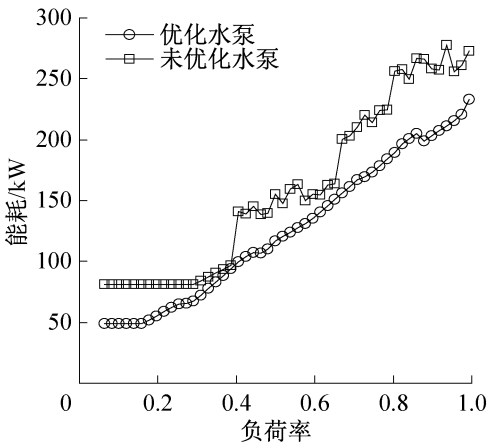


图 9 两种策略下水泵总能耗对比

Fig.9 Contrast of total energy consumption of water pump of two strategies

两种策略控制参数对比如图 10 所示,随着负荷率的增加,最佳供水温度出现先下降再升高再下降的趋势,当机组负荷率较低时,根据机组性能曲线,COP 较低,提高供水温度以提高蒸发温度,使得在相同负荷率下 COP 相比于额定工况有所增加;机组负荷率增加直至最佳 COP 对应负荷率,供水温度不断降低,随着机组负荷率的增加,供水温度对 COP 影响减小,供水温度降低以减少冷冻水流量,实现在对冷水机组能耗影响较小的前提下降低冷冻水泵能耗,达到节能的效果。最佳冷却水流量在负荷率较低的工况下更大,降低机组冷凝温度,以提高 COP。在负荷率较高时,冷凝温度对机组 COP 的影响减小,最佳冷却水流

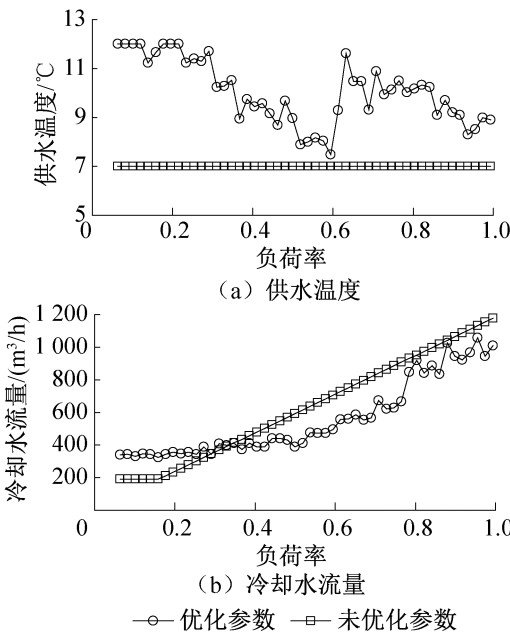


图 10 两种策略控制参数对比

Fig.10 Contrast of control parameters of two strategies

量小于传统策略流量,以减少冷却水泵的能耗,最终实现整个系统的全局优化。图 11、图 12 所示分别为系统总能耗和各设备总能耗随负荷率的变化,曲线的变化情况对应了上述分析。

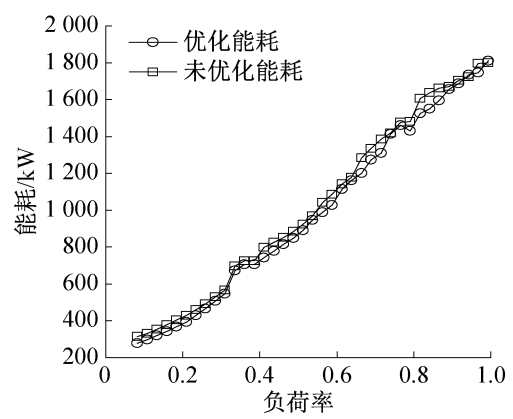
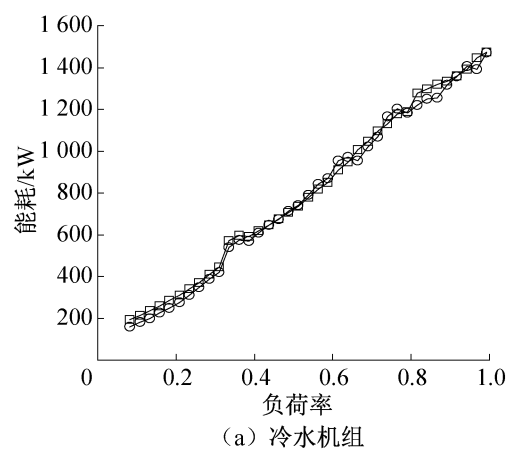


图 11 两种策略系统总能耗对比

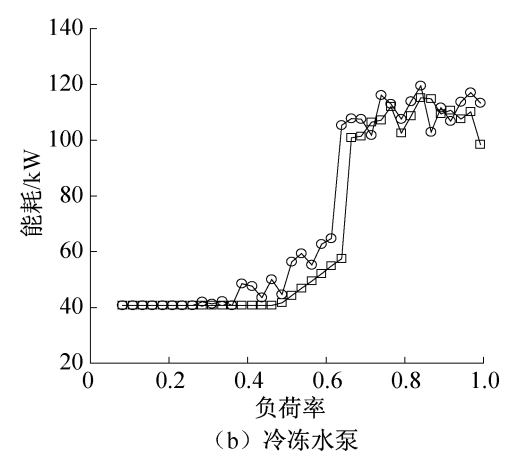
Fig.11 Contrast of total energy consumption of two strategies

3.5 典型日分析

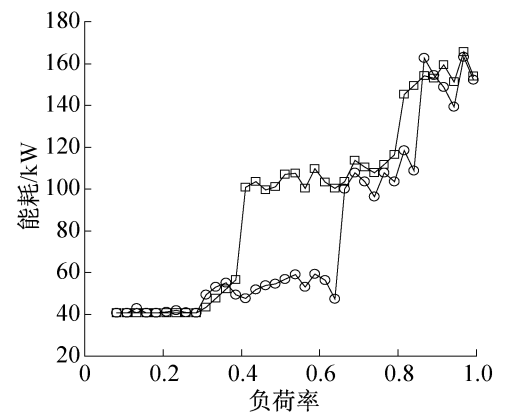
为了分析在实际运行中优化策略的节能效果,根据 DeST 对建筑负荷的模拟计算结果,选取了夏季典型日,其逐时气温和逐时冷负荷如图 13 所示。



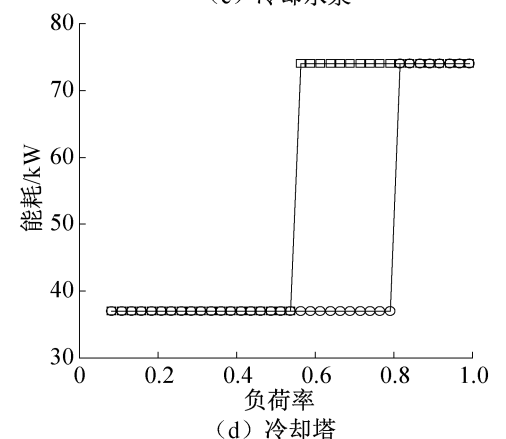
(a) 冷水机组



(b) 冷冻水泵



(c) 冷却水泵



(d) 冷却塔

—○— 优化机组 —□— 未优化机组

图 12 两种策略系统各设备能耗对比

Fig.12 Contrast of energy consumption of each device of two strategies

由于该优化为高维度多变量复杂优化系统,因此选用 Matlab 工具箱中粒子群优化算法 particleswarm 进行全局优化。MinNeighborsFraction 设置为 0.8,以防止陷入局部最优;MaxStallIterations 设置为 5,以加快优化运行速度。

图 14 所示为夏季典型日两种策略总能耗对比,结果表明:在全天不同环境温度及冷负荷变化下,系统优化能耗都要低于未优化能耗,系统总能耗平均节能率为 20.4%。

图 15 所示为夏季典型日两种策略各设备能耗对比,结果表明:冷水机组在系统总能耗中占比较大,达到 72.3%,因此其能耗变化趋势与总能耗变化趋势类似,且优化能耗始终低于未优化能耗。对于冷冻水泵和冷却水泵,在早晚负荷较低时段,由于水泵启停优化策略的介入,使水泵运行在最高效率区间,优化能耗低于未优化能耗;而在负荷较高时段,系统增加冷冻水和冷却水流量,减小冷水机组供回水温差,降低冷水机组能耗,增加水泵能耗,使水泵优化能耗高于未优化能耗,以实现系统的整体节能。

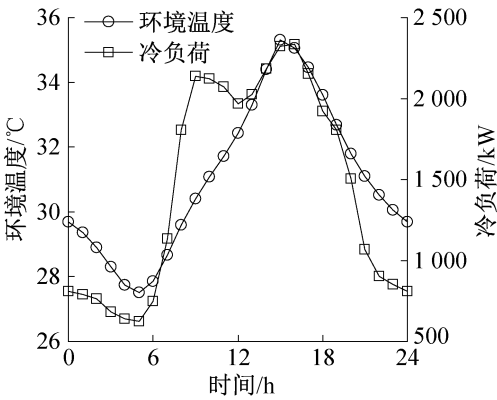


图 13 建筑逐时气温及冷负荷

Fig.13 Hourly temperature and loads of building

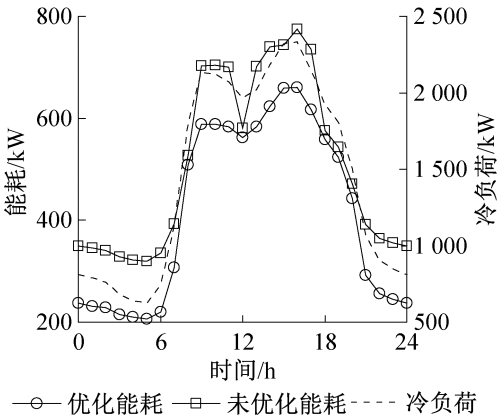


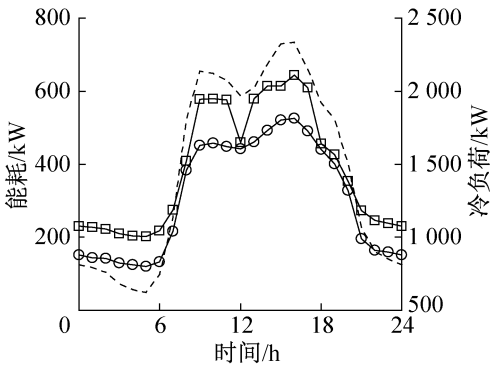
图 14 夏季典型日两种策略总能耗对比

Fig.14 Contrast of total energy consumption of two strategies in summer typical day

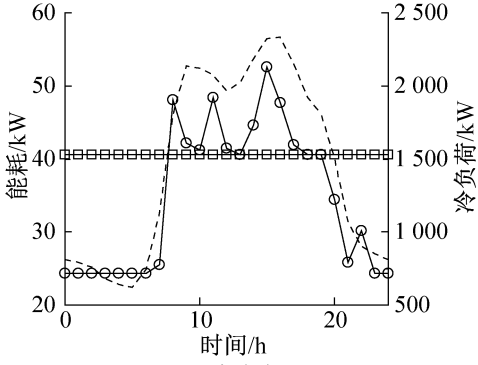
4 结论

本文提出了一套集中空调水系统夏季优化策略方法,包括冷水机组启停优化策略、水泵启停优化策略、控制参数优化方法,并基于一栋医院建筑,与传统的优化策略进行了对比,得出如下结论:

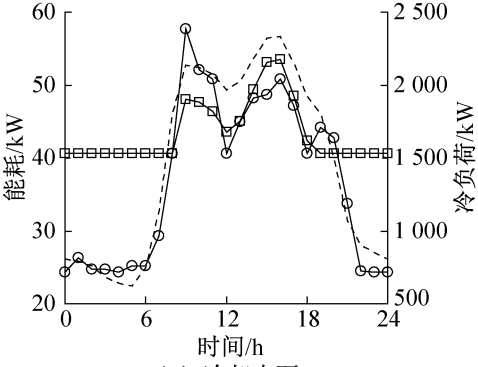
- 1) 冷水机组启停优化策略具有较高的节能性,与传统策略相比,该策略在负荷率 5%~100% 变化范围内,冷水机组平均 COP 提高了 10.9%,平均节省能耗 8.9%。
- 2) 水泵启停优化策略同样具有较高的节能性,在负荷率 5%~100% 变化范围内,水泵平均节省能耗 18.6%。
- 3) 使用上述两种优化策略并对集中空调水系统控制参数进行优化,在夏季典型日,集中空调水系统平均节省能耗 20.4%。



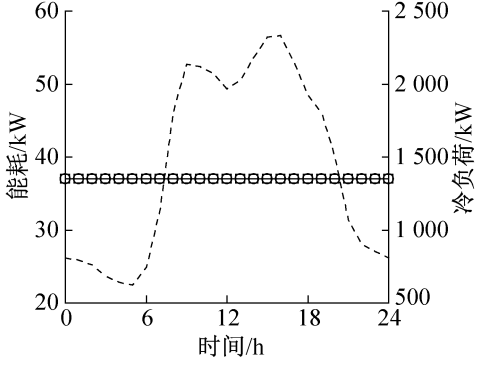
(a) 冷水机组



(b) 冷冻水泵



(c) 冷却水泵



(d) 冷却塔

—○— 优化能耗 —□— 未优化能耗 ---- 冷负荷

图 15 夏季典型日两种策略各设备能耗对比
Fig.15 Contrast of energy consumption of each device of two strategies in summer typical day

参考文献

- [1] 江亿. 我国建筑能耗状况与节能重点[J]. 建设科技, 2007(5): 26–29. (JIANG Yi. Domestic building energy consumption situation and energy-saving priorities[J]. Construction Science and Technology, 2007(5): 26–29.)
- [2] 庄凯, 张九根, 黄亚光. 中央空调冷冻水系统的优化控制与仿真[J]. 科技通报, 2015, 31(1): 240–244. (ZHUANG Kai, ZHANG Jiugen, HUANG Yaguang. Optimal control and simulation of central air-conditioning chilled water system [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(1): 240–244.)
- [3] ALI M, VUKOVIC V, SAHIR M H, et al. Energy analysis of chilled water system configurations using simulation-based optimization[J]. Energy and Buildings, 2013, 59: 111–122.
- [4] SINGH K, DAS R. Exergy optimization of cooling tower for HGSH and HVAC applications [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 136: 418–430.
- [5] ZHANG Yan, CHU Xiaoli, LIU Yang, et al. A modelling and control approach for a type of mixed logical dynamical system using in chilled water system of refrigeration system [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019(1): 1–12.
- [6] 刘兆辉, 李震宇, 谭洪卫, 等. 办公楼变频空气源热泵序列优化控制[J]. 制冷学报, 2017, 38(5): 21–28. (LIU Zhaohui, LI Zhenyu, TAN Hongwei, et al. Optimal sequencing control of variable-speed air-source heat pumps in office building[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(5): 21–28.)
- [7] 闫军威, 陈城, 周璇, 等. 多台冷水机组负荷分配优化策略仿真研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(4): 98–104, 110. (YAN Junwei, CHEN Cheng, ZHOU Xuan, et al. Simulation study on optimal load distribution strategy of multiple chillers[J]. Journal of HV&AC, 2016, 46(4): 98–104, 110.)
- [8] LIU Zhaohui, TAN Hongwei, LUO Duo, et al. Optimal chiller sequencing control in an office building considering the variation of chiller maximum cooling capacity [J]. Energy and Buildings, 2017, 140: 430–442.
- [9] QIU Shunian, LI Zhenhai, LI Zhengwei, et al. Model-free optimal chiller loading method based on Q-learning [J]. Science and Technology for the Built Environment, 2020, 26(8): 1100–1116.
- [10] SOHRABI F, NAZARI-HERIS M, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Optimal chiller loading for saving energy by exchange market algorithm [J]. Energy and Buildings, 2018, 169: 245–253.
- [11] 陈鑫. 集中空调控制参数的全局优化研究[J]. 建筑节能, 2011, 39(3): 17–21. (CHEN Xin. Global optimization of control parameters for central air conditioning [J]. Building Energy Efficiency, 2011, 39(3): 17–21.)
- [12] ZHUANG Luping, CHEN Xi, GUAN Xiaohong. A bi-level optimization for an HVAC system[J]. Cluster Computing, 2017, 20(4): 3237–3249.
- [13] DENG Jiewen, HE Shi, WEI Qingpeng, et al. Research on systematic optimization methods for chilled water systems in a high-rise office building [J]. Energy and Buildings, 2020, 209: 109695.
- [14] YAO Ye, YU Yuebin. Modeling and control in air-conditioning systems [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.

通信作者简介

姚晔,男,副教授,博士生导师,上海交通大学制冷与低温工程研究所,13641943577,E-mail: yeyao10000@sjtu.edu.cn。主要研究方向:公共建筑环控系统智能优化控制技术,高效除湿技术等。

About the corresponding author

Yao Ye, male, associate professor, Ph. D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 13641943577, E-mail: yeyao10000@sjtu.edu.cn. Research fields: intelligent optimization control technology for environmental control system of public buildings, high efficiency dehumidification technique.