

文章编号:0253-4339(2020)04-0068-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.04.068

基于运行数据包络线的冷水机组运行优化策略研究

宁玉飘 晋欣桥 王逸骏 于子尧 杜鑫

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘 要 为提高冷水机组能效,本文提出一种基于冷水机组运行数据性能包络线的负荷分配优化控制策略。基于历史运行数据,采用数据衍生与移动窗口方法,获取了冷水机组的性能包络线,并基于性能包络线对负荷分配进行优化。通过在我国南方某机场空调系统运行测试,对本策略进行了验证并与顺序启停控制策略进行了对比,结果表明:该控制策略具有较好的节能效果。在典型日,该控制策略相比顺序启停控制策略的节能效果提升 8.2%。

关键词 冷水机组;启停控制;负荷分配优化;性能包络线

中图分类号:TB61⁺1;TU831.4

文献标识码:A

Optimal Operation Strategy of Multiple Chiller System Based on the Best-Performance Line of History Data

Ning Yupiao Jin Xinqiao Wang Yijun Yu Ziyao Du Xin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract Chillers usually account for a major part of the overall energy consumption in commercial buildings. To improve the energy efficiency of chillers, we present an optimal chiller loading control strategy based on the best-performance line of the chiller. The best-performance line is created from historic operation data by using the moving window and data proliferation methods. The strategy is validated using an airport air-conditioning system in south China. The strategy is compared with sequencing control strategy. The results show that the proposed strategy shows a better performance with respect to energy saving. On typical days, the operating condition of the chillers can be optimized to save energy up to 8.2%.

Keywords chiller; sequence control; chiller load optimization; the best performance line

在空调系统设计过程中,为了满足建筑室内热舒适性要求,空调系统通常按照建筑最大冷负荷进行设计,因此在大部分运行时间内,建筑空调系统冷负荷小于其设计负荷^[1]。而在部分负荷运行工况下,冷水机组的部分负荷率(part load ratio, PLR)与能效比(coefficient of performance, COP)之间存在着重要关系,且不同型号机组的对应关系不尽相同。因此,对于多台冷水机组联合运行的空调系统,在满足空调冷负荷需求的前提下,可以通过优化多台冷水机组的负荷分配,提高冷水机组系统的 COP^[2-4]。

自 2000 年开始,已有学者对冷水机组优化问题进行研究^[5-8]。Chang Y. C. 等^[9]将负荷分配问题建立数学模型,并利用拉格朗日算法求解。刘雪峰等^[10]建立了不同冷水机组的数学模型,发现冷水机组处于 70%~100% 的部分负荷率下能效比最高。张

旭豪等^[11]提出通过建立冷水机组总能耗的目标方程,利用遗传算法求解目标方程,获取各冷水机组所承担的最优负荷,通过控制每台机组冷冻水出水温度,从而实现冷水机组负荷分配的优化控制。Fan Bo 等^[12]开发了基于冷负荷率概率密度分布的最优控制策略。L. D. S. Coelho 等^[13]提出一种新的布谷鸟搜索方法和一种改进的萤火虫算法,以优化冷水机组负荷分配。Shan K. 等^[14]利用数据驱动模型制定了最优控制策略。方兴等^[15]基于焓分析方法对空调系统进行多目标运行优化,以提高空调系统的运行效率。Huang S. 等^[16]采用基于模型预测的优化方法,根据预测的冷负荷和湿球温度进行连续优化。

本文首先根据已有历史运行数据进行数据衍生获取了冷水机组系统的性能图,然后采用移动窗口算法获取了冷水机组性能包络线。最后以冷水机组性

能包络线为基础获得冷水机组系统在当前冷负荷下的冷水机组负荷分配情况。本文选取某一建筑空调系统的典型日为例,对冷水机组系统进行优化,并与其它两种控制策略进行对比。

1 研究对象

本文研究对象为中国南方某机场航站楼空调系统。该航站楼总建筑面积约为 99 300 m²,其中空调面积约占 67 950 m²,图 1 所示为航站楼空调系统的结构示意图。该空调系统包括 4 台离心式冷水机组、5 台冷却塔、4 台冷冻水泵、4 台冷却水泵以及 1 台二次泵。在 4 台冷水机组中,3 台型号相同,额定制冷量为 2 460 kW,额定功率为 470 kW,本文分别记为 T1、T2、T3,剩余的一台冷水机组额定制冷量为 4 640 kW,额定功率为 836 kW,记为 Y。

该航站楼供冷时间为每年 4—10 月,空调系统每日运行时间为 7:00—22:00,当室外干球温度高于 22 ℃时,冷水机组开启供冷模式,否则空调系统仅开启通风模式。在原始冷水机组运行控制策略中,冷冻水出水温度设定值为 7 ℃,冷水机组的运行控制为传统的顺序启停控制,即基于当前冷负荷的大小按预设顺序依次启停冷水机组。

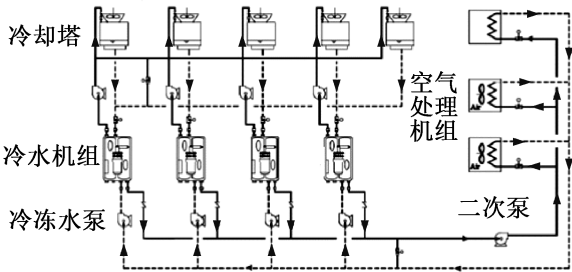


图 1 某航站楼空调系统示意图

Fig.1 Schematic of HVAC system in one airport

在研究空调系统中,常规顺序启停控制的控制策略如图 2 所示,其控制策略主要如下:

- 1) 当冷负荷小于 T 型号机组的额定制冷量时,启动机组 T1。
- 2) 当冷负荷小于 2 台 T 型号机组的额定制冷量,但大于 T 型号机组的额定制冷量时,加开机组 T2。
- 3) 当冷负荷小于 3 台 T 型号机组的额定制冷量,但大于 2 台的 T 型号机组的额定制冷量时,加开机组 T3。
- 4) 当冷负荷大于 3 台 T 型号机组的额定制冷量时,加开机组 Y。

该空调系统在 TRNSYS 17 仿真软件中进行了建

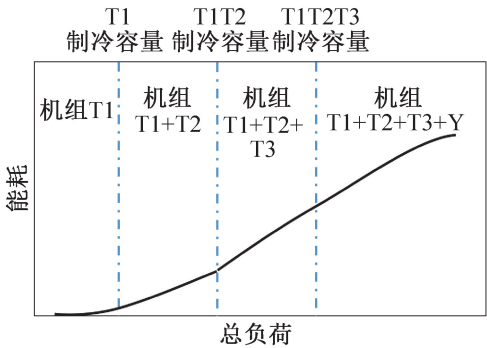


图 2 顺序控制策略

Fig.2 Sequencing control of chillers

模,其准确性得到了验证^[12]。

2 冷水机组负荷分配优化策略

为了节约系统能耗,本文采用优化冷水机组负荷分配的方法使冷水机组在部分负荷时达到较高 COP。通常情况下,多冷水机组系统通过 Hankerer 在 ASHARE^[17]手册中提出的平均负荷率法来优化负荷分配。平均负荷率法指在负荷分配过程中,保持各台运行机组的 PLR 相等,即各台冷水机组的负荷等于各机组额定制冷量乘以系统总冷负荷与所有运行机组的总额定制冷量之比。该方法简单易用,但由于不同型号冷水机组的 PLR 与 COP 对应关系不尽相同,因此一般不能达到最优效果。

为了更好地进行优化,本文基于已有的空调系统历史运行数据,通过数据衍生方法获取冷水机组性能图的高效率区域,并通过移动窗口算法获取冷水机组的性能包络线(即上边界线)。本文以冷水机组的性能包络线为指导,获取每台冷水机组的启停状态以及承担负荷。

2.1 冷水机组性能包络线概念

冷水机组的性能图如图 3 所示,是指冷水机组系统在当前工况下所有可能出现的总负荷-总能效比点的集合。冷水机组性能包络线是指冷水机组性能图的上边界线,其上边界线由性能点中较高总效率的性能点连接构成。冷水机组性能图理论上包含了冷水机组系统在不同负荷下所有可能出现的总负荷-总能效比点。因此,其上边界线代表了在当前工况下最高效率的运行状态。因此,本文以冷水机组的性能包络线为指导对冷水机组负荷分配进行优化。

2.2 冷水机组性能包络线的获取

在实际工程中,由于历史运行数据量有限,直接使用已有历史运行数据绘图只能构建冷水机组性能图中的一部分,一般不能获取准确且完整的冷水机组

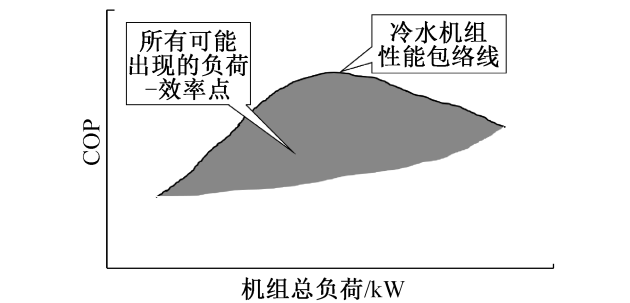


图 3 冷水机组性能图
Fig.3 Chiller's best performance line

性能包络线。因此,为了获取更加准确完整的冷水机组性能包络线,本文首先对已有历史运行数据进行数据衍生处理。

2.2.1 数据衍生

在多台冷水机组联合运行过程中,各台冷水机组可以认为是互不干扰、独立工作的。此时,可通过将各个机组中不同历史总负荷-总能效比点进行重新组合,产生更多的运行机组组合的负荷-功耗点,从而使冷水机组性能图趋于完整。本文采用笛卡尔乘积来进行数据衍生。集合 A 和集合 B 的笛卡尔乘积是指第一个对象是 A 的成员而第二个对象是 B 的所有可能有序对的其中一个成员。如式(1)所示:

$$A \times B = \{(a,b) \mid a \in A \ \& \ b \in B\}$$
 (1)

式中:A 和 B 为数据集。

在本文中,集合 A 和集合 B 分别为两组不同的能耗-负荷点的集合,如表 1 所示,为包含有 4 台不同机组的数据集,每个数据集数据量为 2。

表 1 原始数据集
Tab.1 Row data

序号	机组序号	能耗	负荷
第一组数据	1	P ₁₁	q ₁₁
	2	P ₂₁	q ₂₁
	3	P ₃₁	q ₃₁
	4	P ₄₁	q ₄₁
第二组数据	1	P ₁₂	q ₁₂
	2	P ₂₂	q ₂₂
	3	P ₃₂	q ₃₂
	4	P ₄₂	q ₄₂

两组数据进行笛卡尔乘积后,再重新计算重组后数据点的总能耗与总负荷,获得衍生所得数据点 16 个。图 4 所示为包含 4 台机组的数据集的笛卡尔乘

积结果。

序号	机组1、2、3、4		
	能耗	负荷	
1	P ₁₁ +P ₂₁ +P ₃₁ +P ₄₁	q ₁₁ +q ₂₁ +q ₃₁ +q ₄₁	原始历史数据
2	P ₁₂ +P ₂₂ +P ₃₂ +P ₄₂	q ₁₂ +q ₂₂ +q ₃₂ +q ₄₂	
3	P ₁₁ +P ₂₁ +P ₃₁ +P ₄₂	q ₁₁ +q ₂₁ +q ₃₁ +q ₄₂	
4	P ₁₁ +P ₂₁ +P ₃₂ +P ₄₁	q ₁₁ +q ₂₁ +q ₃₂ +q ₄₁	
5	P ₁₁ +P ₂₁ +P ₃₂ +P ₄₂	q ₁₁ +q ₂₁ +q ₃₂ +q ₄₂	
6	P ₁₁ +P ₂₂ +P ₃₁ +P ₄₁	q ₁₁ +q ₂₂ +q ₃₁ +q ₄₁	衍生所得数据
7	P ₁₁ +P ₂₂ +P ₃₁ +P ₄₂	q ₁₁ +q ₂₂ +q ₃₁ +q ₄₂	
8	P ₁₁ +P ₂₂ +P ₃₂ +P ₄₁	q ₁₁ +q ₂₂ +q ₃₂ +q ₄₁	
9	P ₁₁ +P ₂₂ +P ₃₂ +P ₄₂	q ₁₁ +q ₂₂ +q ₃₂ +q ₄₂	
10	P ₁₂ +P ₂₁ +P ₃₁ +P ₄₁	q ₁₂ +q ₂₁ +q ₃₁ +q ₄₁	
11	P ₁₂ +P ₂₁ +P ₃₁ +P ₄₂	q ₁₂ +q ₂₁ +q ₃₁ +q ₄₂	
12	P ₁₂ +P ₂₁ +P ₃₂ +P ₄₁	q ₁₂ +q ₂₁ +q ₃₂ +q ₄₁	
13	P ₁₂ +P ₂₁ +P ₃₂ +P ₄₂	q ₁₂ +q ₂₁ +q ₃₂ +q ₄₂	
14	P ₁₂ +P ₂₂ +P ₃₁ +P ₄₁	q ₁₂ +q ₂₂ +q ₃₁ +q ₄₁	
15	P ₁₂ +P ₂₂ +P ₃₁ +P ₄₂	q ₁₂ +q ₂₂ +q ₃₁ +q ₄₂	
16	P ₁₂ +P ₂₂ +P ₃₂ +P ₄₁	q ₁₂ +q ₂₂ +q ₃₂ +q ₄₁	

图 4 笛卡尔数据衍生结果
Fig.4 Result of Cartesian product

笛卡尔乘法是一种较为简单有效的数据衍生方式,可以大大增加数据点,丰富冷水机组的性能图,为获取更加完整的性能包络线奠定了基础。但在笛卡尔乘积衍生下,衍生所得数据点的增长随原始历史数据点增长为指数型增长,在历史数据点较多和冷水机组数量较多的情况下,会出现数据爆炸的情况。以本文研究的冷水机组系统为例,共 4 台并行冷水机组,在记录有 2 000 条历史数据的情况下,笛卡尔乘积将产生 2 000⁴ = 1.6×10¹³ 个数据点,给后续工作带来不便。

考虑到本文的目标是获取冷水机组性能包络线,即冷水机组性能图的上边界线,因此在性能图中大量位于上边界线以下的数据点是冗余的,本文采用移动窗口法对产生的数据点进行处理,剔除冗余点,并获取冷水机组性能包络线。

2.2.2 移动窗口算法

移动窗口算法是在冷水机组的性能图中,利用一个具有数据点容量的窗口,由低负荷点向高负荷点逐步移动,每步选取窗口中 COP 最高的数据点,从而获取一批高效率的运行数据点,并拟合数据点构成冷水机组性能包络线。

移动窗口算法如图 5 所示,主要步骤如下:

- 1) 将已有数据点(包括原始历史数据点与衍生数据点)按总负荷由小到大的顺序进行排列。
- 2) 建立一个具有一定数据点容量的窗口,窗口将从最低负荷点开始,按顺序逐步向高负荷点移动,每次移动挑选出窗口中的最高总 COP 点。这一步骤从窗口右侧进入数据点开始,直到窗口完全离开数据点序列结束。

3)所有被挑选的点在剔除重复数据后,即构成一个新的数据点序列,这个新序列的点均位于冷水机组性能图的上边界包络线上,因此它们可以用作冷水机组性能包络线的估计。

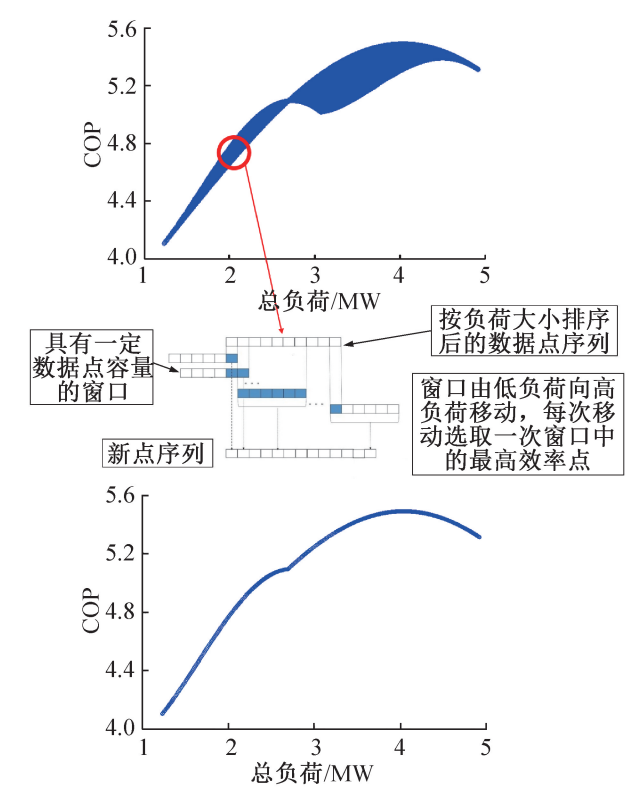


图 5 移动窗口算法示意图
Fig.5 Moving window method

移动窗口算法的处理效果由窗口容量决定,窗口容量过大会获得过于光滑的冷水机组性能包络线,导致丢失一些重要的细节特征;窗口容量过小则导致无法去除上边界以下的冗余点。因此,合适的窗口容量需要通过尝试确定。

2.2.3 基于冷水机组性能包络线的运行策略

在获取大量位于冷水机组性能包络线上的数据点后,其拟合曲线可以近似认为是冷水机组的性能包络线。冷水机组的性能包络线是其性能图的上边界线,越接近冷水机组性能包络线的性能点拥有更高的运行效率。因此,冷水机组的性能包络线可以指导冷水机组的负荷分配优化。

在获取大量位于冷水机组性能包络线上的数据点后,可以利用插值法来获取当前冷负荷下各台冷水机组的启停状态以及各台冷水机组承担负荷,如图 6 所示,其运行控制策略如下:

- 1)根据当前冷负荷,寻找冷负荷点在图中位置并找出位于冷负荷点左右最近的数据点。
- 2)若两侧数据点开启各类型冷水机组的数量相

同,负荷点 1 左右侧最近数据点为点 A 和点 B,点 A 与点 B 开启机组相同,均开启 2 台 T 型机组,则当前冷负荷点下的冷水机组的启停状态与两侧数据点中记录的冷水机组启停状态相同。各台冷水机组所承担负荷采用插值法获取。插值法为点 A 和点 B 的各台机组的分配负荷进行线性插值。插值算法如式 (2)所示:

$$LOAD_i = LOAD_{ai} + \frac{LOAD_{bi} - LOAD_{ai}}{LOAD_B - LOAD_A} \times (LOAD_{total} - LOAD_A) \quad (2)$$

式中: $LOAD_i$ 为当前第 i 台机组的分配负荷, kW; $LOAD_{ai}$ 为负荷数据点 A 中第 i 台机组的分配负荷, kW; $LOAD_{bi}$ 为负荷数据点 B 中第 i 台机组的分配负荷, kW; $LOAD_A$ 为负荷数据点 A 总负荷, kW; $LOAD_B$ 为负荷数据点 B 总负荷, kW; $LOAD_{total}$ 为当前总冷负荷, kW。

3)若两侧数据点开启各类型冷水机组的数量不完全相同,负荷点 2 左右侧最近数据点为点 C 和点 D,而点 C 开启 2 台 T 型机组,点 D 开启 2 台 T 型机组和 1 台 Y 型机组,两点开启机组数量与种类不同,则当前冷负荷下的冷水机组的启停状态以及各台冷水机组承担负荷与冷负荷较大的右侧数据点保持一致,从而保证提供足够的冷负荷。

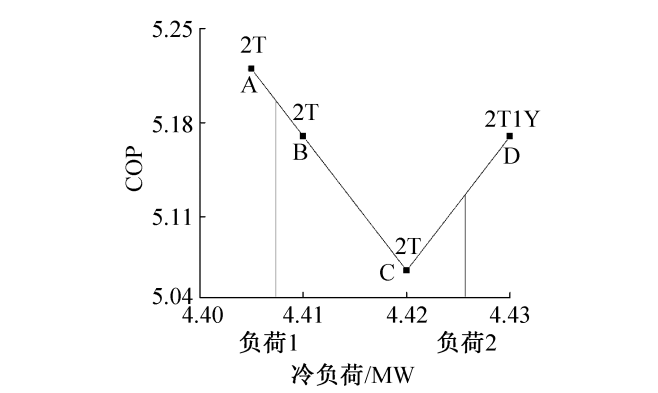


图 6 基于冷水机组性能包络线插值获取负荷分配
Fig.6 Load contribution obtained based on the linear interpolation of the best performance line

4)为了防止冷水机组的频繁启停,在算法控制间隔较小时,加入冷水机组启停控制约束:当优化算法获取的冷水机组启停状态与当前冷水机组启停状态不同时,与前一控制节点算法获取的冷水机组启停状态进行对比。若两者不一致,则此时冷负荷可能处于波动状态,为了防止冷水机组频繁启停,此时保持原冷水机组启停状态不变;若两者一致,说明算法连续两次判断需要更改,则按照算法优化结果改变冷水机组启停状态。因此,获得了在当前冷负荷下各台冷

水机组的分配负荷,在数据点足够密集的情况下,既可以保证足够的冷负荷供给,又可以使性能点更接近性能包络线,即拥有更高的运行效率。

3 仿真运行结果与分析

将上述运行优化策略在研究对象的空调系统进行仿真验证,选取全年中某一典型日为例,对空调系统进行了负荷分配优化。图 7 所示为在仿真空调系统中建筑冷负荷在空调运行时间内的逐时变化情况。仿真系统中建筑冷负荷由式(3)计算:

$$LOAD_{total} = C \sum_{i=1}^n (q_i (T_{chwi,i} - T_{chwo,i})) \quad (3)$$

式中: C 为水的比热容, $J/(kg \cdot K)$; q_i 为第 i 台冷水机组冷冻水质量流量, kg/s ; $T_{chwi,i}$ 、 $T_{chwo,i}$ 分别为第 i 台冷水机组的冷冻水进、出水温度, K 。

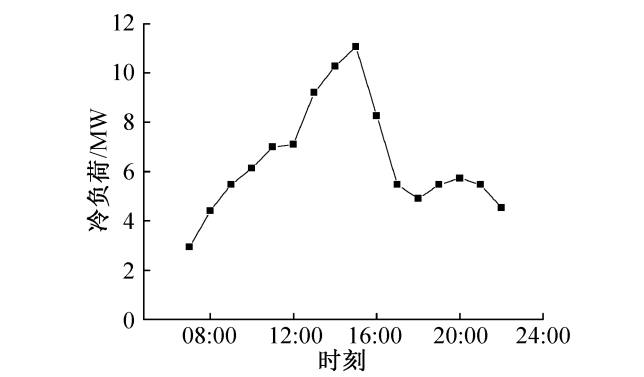


图 7 典型日建筑冷负荷
Fig.7 Building's cooling load on typical day

3.1 性能包络线的获取及运行优化策略

利用已有的仿真器,应用顺序启停控制策略,本文获取了 4—10 月气象参数下的运行数据。基于运行数据,应用笛卡尔数据衍生和移动窗口算法,本文获取了冷水机组系统的性能包络线。冷水机组性能包络线的获取步骤如图 8 所示。

- 1) 将同一型号机组的历史数据进行整合。本文案例中, T 型机组的历史运行数据集合为 T1 ~ T3 机组的历史运行数据的并集, T1 ~ T3 共用历史运行数据集。 Y 型机组的历史运行数据集合即为 Y 机组的历史运行数据集。
- 2) 取 1 台 T 型机组的历史运行数据与 1 台 Y 型机组的历史运行数据进行笛卡尔乘积, 此时获得 1 台 T 型机组与 1 台 Y 型机组并联的冷水机组系统(本文简称: 1T1Y)的运行数据点。
- 3) 根据上述移动窗口算法获取一个位于 1T1Y 冷水机组性能图的上边界包络线上的数据点集合。
- 4) 重复步骤 2 和步骤 3, 直到获得一个位于

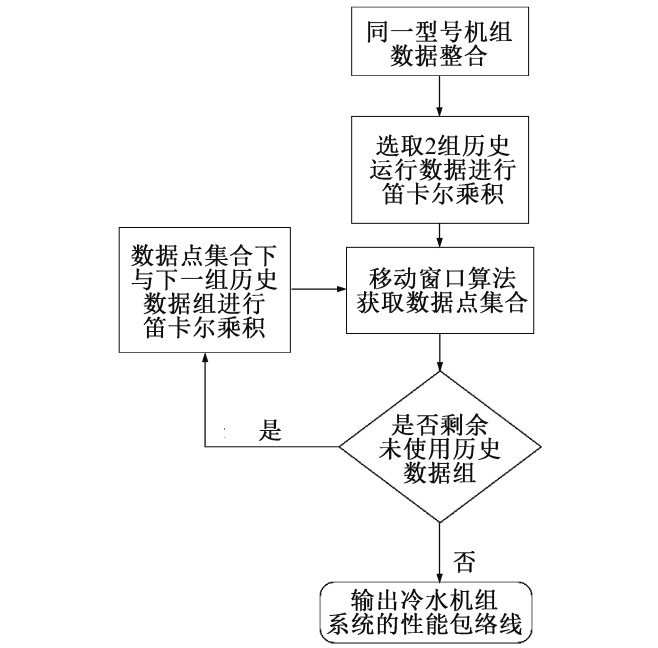


图 8 性能包络线获取流程图
Fig.8 The procedure of best performance line

3T1Y 冷水机组系统的性能包络线上的数据点集合。最终,本文获取的研究对象的冷水机组系统的性能包络线如图 9 所示。图中性能包络线由一批位于性能包络线上的数据点构成。

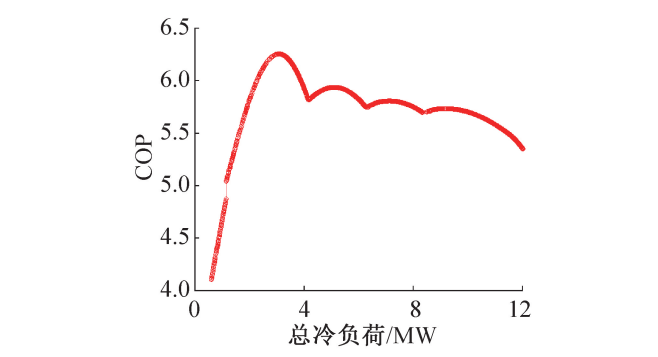


图 9 研究对象冷水机组性能包络线
Fig.9 The best performance line of chillers system in the study

根据 3T1Y 冷水机组系统的性能包络线上的数据点集合,采用插值法获取在当前冷负荷下的冷水机组的启停状态和每台冷水机组所承担的冷负荷。

3.2 控制策略结果分析

图 10 所示为负荷分配优化控制下和顺序启停控制下冷水机组在典型日的冷水机组启停数量变化。由图 10 可知,基于性能包络线算法优化控制下冷水机组运行数目减少。图 11 和图 12 所示分别为两种控制策略下冷水机组负荷分配。通过对比可知,由于优化控制策略比顺序启停控制策略减少了运行机组

的数目,因此各台运行冷水机组的分配负荷更高。

图 13 所示为两种控制策略下冷水机组系统的总 COP 对比结果。优化后的 COP 均大于或等于顺序启停控制,这说明基于性能包络线的控制策略可有效提高冷水机组系统的 COP,达到节能的目的。

型日全天的运行能耗对比。基于性能包络线的优化控制策略具有明显的节能效果,与原有的顺序启停控制相比,节能约为 8.2%。

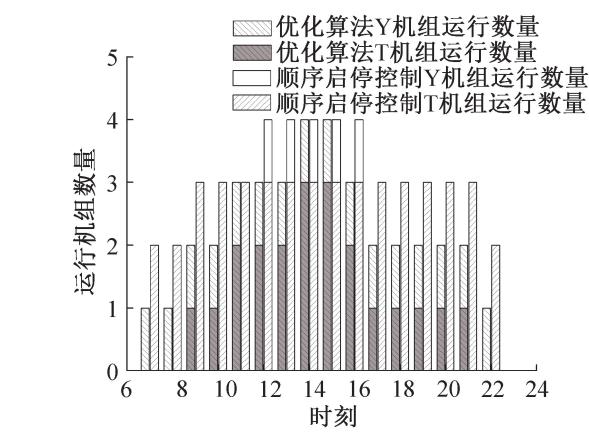


图 10 两种控制策略典型日启动机组数量对比
Fig.10 Chiller operating number comparison under two strategies in typical day

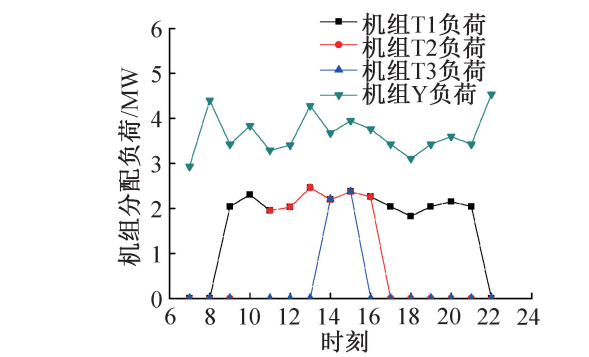


图 11 典型日基于性能包络线优化控制冷水机组负荷分配
Fig.11 Cooling load distribution determined under control of strategies based on best performance line in typical day

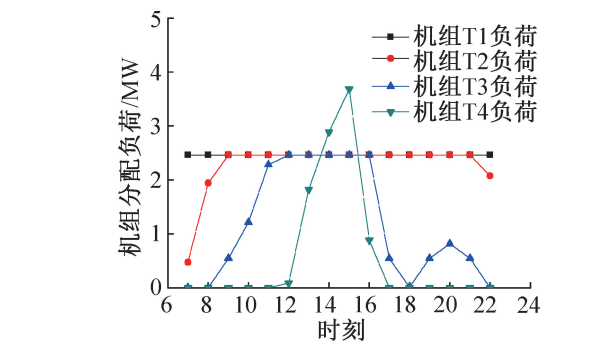


图 12 典型日顺序启停控制冷水机组负荷分配
Fig.12 Cooling load distribution determined under control of sequencing control in typical day

图 14 所示为两种控制策略下冷水机组系统的典

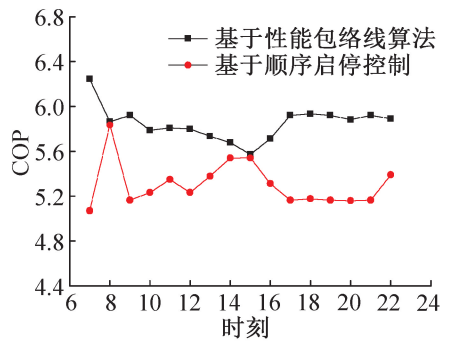


图 13 典型日两种策略 COP 对比
Fig.13 COP comparison under two strategies in typical day

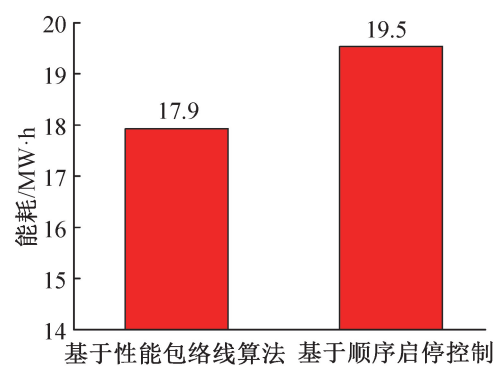


图 14 典型日能耗对比
Fig.14 Energy consumption comparison in typical day

4 结论

本文利用已有的空调系统历史运行数据获取冷水机组的性能包络线,并根据性能包络线计算当前冷负荷下各台冷水机组的负荷分配情况。在已有的某航站楼空调系统的仿真模型的基础上,获取了仿真系统在 4—10 月运行工况下的运行数据。基于运行数据,使用笛卡尔数据衍生和移动窗口算法获取了冷水机组系统的性能包络线。在性能包络线的基础上,基于插值法获得了冷水机组启停和负荷分配优化控制策略。以一典型日的运行工况为例,对空调系统进行了冷水机组启停控制和负荷分配进行了优化。优化结果表明:

- 1) 笛卡尔数据衍生和移动窗口算法可以有效剔除冗余数据点并获取冷水机组系统的性能包络线。
- 2) 采用基于性能包络线的算法可以通过对冷水机组的启停与负荷分配的优化控制实现系统 COP 的提升并降低能耗。
- 3) 采用基于性能包络线的算法优化各个冷水机

组部分负荷率相较于常规的顺序启停控制策略在典型日,开启机组数量减少,冷水机组的整体 COP 更高,节能约 8.2%。

参考文献

- [1] 薛殿华. 空气调节[M]. 北京:清华大学出版社, 1991: 42-58. (XUE Dianhua. Air conditioning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991:42-58.)
- [2] 晋欣桥, 李晓峰, 任海刚. 楼宇空调变水量冷媒水系统实时优化控制[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 1128-1131. (JIN Xinqiao, LI Xiaofeng, REN Haigang. On-line optimal control of variable water volume systems in HVAC systems[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(7): 1128-1131.)
- [3] JIN Xinqiao, DU Zhimin, XIAO Xiaokun. Energy evaluation of optimal control strategies for central VAV chiller systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 934-941.
- [4] AUSTIN S B. Chilled water system optimization [J]. ASHRAE Journal, 1993(7): 26-32.
- [5] 姜家麒. 多台冷水机组系统组合的控制[J]. 制冷技术, 2000(2): 31-34 (JIANG Jiaqi. Control of multiple-chillers system[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2000(2): 31-34.)
- [6] 叶蔚, 张旭, 王松庆, 等. 夏季不同冷水机组联合运行节能控制策略研究[J]. 制冷技术, 2009(1): 25-29. (YE Wei, ZHANG Xu, WANG Songqing, et al. Research on energy efficiency control strategy for chillers with different performance operating in combination in summer [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2009(1): 25-29.)
- [7] 荣剑文. 冷水机组群控策略的讨论[J]. 暖通空调, 2005(12): 176-177. (RONG Jianwen. Discussion on group control strategy of chillers [J]. Journal of HV & AC, 2005(12): 176-177.)
- [8] 贾晶. 冷水机组全年能耗评估方案探讨[J]. 制冷技术, 2012(2): 45-47, 56. (JIA Jing. Discussion of estimating the chiller annual energy consumption [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2012(2): 45-47, 56.)
- [9] CHANG Y C. A novel energy conservation method — optimal chiller loading [J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2/3): 221-226.
- [10] 刘雪峰, 刘金平. 均匀负荷分配的冷水机组并联运行特性分析[J]. 制冷学报, 2006, 27(6): 43-47. (LIU Xuefeng, LIU Jinping. Parallel operation characteristics analy-

sis of water chiller of uniform load distribution [J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(6): 43-47.)

- [11] 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(3): 15-18. (ZHANG Xuhao, JIN Xinqiao, DU Zhimin, et al. Optimal operation of the chiller system based on genetic algorithm [J]. Building Energy and Environment, 2011(3): 15-18.)
- [12] FAN Bo, JIN Xinqiao, DU Zhimin. Optimal control strategies for multi-chiller system based on probability density distribution of cooling load ratio [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(10): 2813-2821.
- [13] COELHO L D S, KLEIN C E, SABAT S L, et al. Optimal chiller loading for energy conservation using a new differential cuckoo search approach [J]. Energy, 2014, 75: 237-243.
- [14] SHAN K, WANG S, GAO D C, et al. Development and validation of an effective and robust chiller sequence control strategy using data-driven models [J]. Automation in Construction, 2016, 65: 78-85.
- [15] 方兴, 晋欣桥, 杜志敏, 等. 基于焓分析的空调系统运行控制的多目标优化[J]. 制冷学报, 2016, 37(4): 7-14. (FANG Xing, JIN Xinqiao, DU Zhimin, et al. Multi-objective optimization method for HVAC system based on exergy analysis [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(4): 7-14.)
- [16] HUANG S, ZUO W, SOHN M D. A new method for the optimal chiller sequencing control [C]//The 14th Conference of International Building Performance Simulation Association (Building Simulation 2015). 2015: 316-323.
- [17] HACKNER R J, MITCHELL J W, BECKMAN W A. HVAC system dynamics and energy use in buildings-part II [J]. ASHRAE Transactions, 1985, 91(1B): 781-795.

通信作者简介

晋欣桥,男,教授,博士生导师,上海交通大学制冷与低温工程研究所, (021) 34206774, E-mail: xqjin@sjtu.edu.cn。研究方向: 制冷空调系统仿真与优化控制, 建筑空调系统故障诊断等研究。

About the corresponding author

Jin Xinqiao, male, professor, Ph.D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 2134206774, E-mail: xqjin@sjtu.edu.cn. Research fields: simulation and optimal control of HVAC&R system, FDD of HVAC&R system.