

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.04.011

基于动态负荷预测的冰蓄冷系统运行策略优化

赖学江,黄森炜,廖洪毅,曹智校,陈清云

(广东海洋大学 机械与动力工程学院,广东 湛江 524088)

摘要:以深圳某办公楼为例,探讨冰蓄冷空调系统运行策略的优化。采用鸿业全年负荷计算及能耗分析软件(HY-EP)进行全年动态负荷模拟,对冷负荷的负荷率进行分析。在选定冰蓄冷系统后,基于模拟结果和地区的峰谷平电价的特点,采用了基于全年动态负荷结果分析预测和结合前一天的负荷作为当日的负荷预测,将全年逐日运行策略简化为4种设备的运行方案,控制较为容易实现,且需要增加的初投资较少,是结合冰蓄冷系统与全年动态负荷模拟技术的创新应用。

关键词:冰蓄冷;全年动态负荷模拟;预测控制

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)04-0372-06

Operation strategy optimization of ice storage system based on dynamic load forecasting

LAI Xuejiang, HUANG Senwei, LIAO Hongyi, CAO Zhixiao, CHEN Qingyun

(School of Mechanical and Power Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: Taking an office building in Shenzhen as an example, the operation strategy optimization of ice storage air conditioning system was discussed. Hongye annual load calculation and energy consumption analysis software (HY-EP) was used to simulate the annual dynamic load. The load rate of the cooling load was discussed. After the ice storage system was selected, based on the simulation results and the characteristics of the peak-valley TOU power price of the region, an innovative method based on the analysis and prediction of annual dynamic load results and combined with the load of the previous day is adopted as the load forecast of the day. It is an innovative application of ice storage system and annual dynamic load simulation technology, which simplifies the whole year day-to-day operation strategy to four equipment operation schemes, and the control is easier to achieve, and the initial investment that needs to be increased is less than expected.

Keywords: ice storage; annual dynamic load simulation; predictive control

1 建筑设计概况

设计的办公楼位于深圳南山科技园北区,是一栋现代化的超高层办公楼,其建筑用地 $5\,999\text{ m}^2$,地上39层,地下3层,为甲类办公楼,建筑面积 $88\,180\text{ m}^2$,建筑总高度193 m。1~3层为展览厅,会议室和商务大堂,45、8~14、16~29、31~36层为研发区(员工办公区),15、30层为避难层,37~39层为总办研发区,6、7层为数据机房。结构体系采用框架-核心筒的结构形式,外墙为单元体玻璃幕墙。

2 负荷计算及空调系统方案的选择

2.1 全年动态负荷计算

设计使用了鸿业全年负荷计算及能耗分析软件(HY-EP)建模,并对其进行全年动态负荷模拟计算。

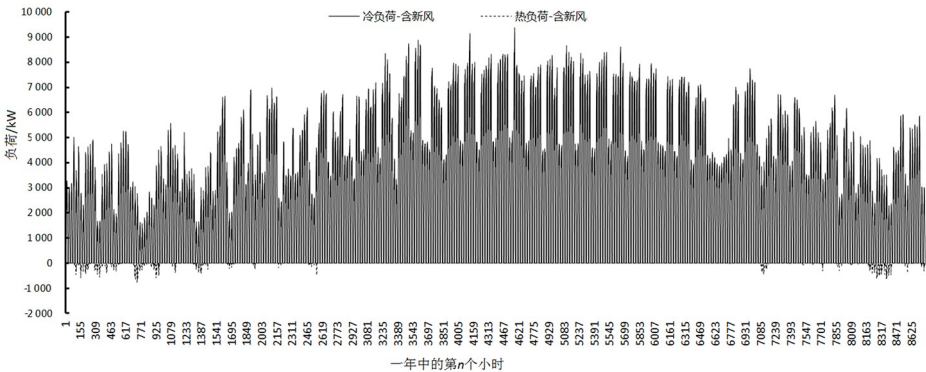
经过动态负荷模拟,全年负荷逐时值如图1,出现最大负荷的时间6~9月,最大负荷值为 $9\,200\text{ kW}$ 。冷负荷的负荷率分布如图2,40%~50%冷负荷的小时数1 060 h,约占供冷时数的18%。90%~100%的冷负荷的小时数仅为45 h,

收稿日期: 2021-06-22

第一作者简介: 赖学江(1962—),女,广东高州人,教授,研究方向:建筑节能及自动控制。

高负荷的时数较低,只有通过合理选配设备才能使系统的运行效率高。热负荷集中出现于 12 月 2 月,最大值不足 1 500 kW,许多时刻既存在逐时热负荷,同时也存在逐时冷负荷。这是因为 HY-

EP 考虑了人员、灯光、设备等因素的发热。建筑内区的灯光、人员、设备产生的热量无法排除,内区需制冷,外区需供热,但需供热量不大,可以通过新风供热运行提供热量,不需要单独供热。



备注:负值表示热负荷,并不代表数值正负。

图 1 全年逐时负荷值
Fig.1 Annual hourly load value

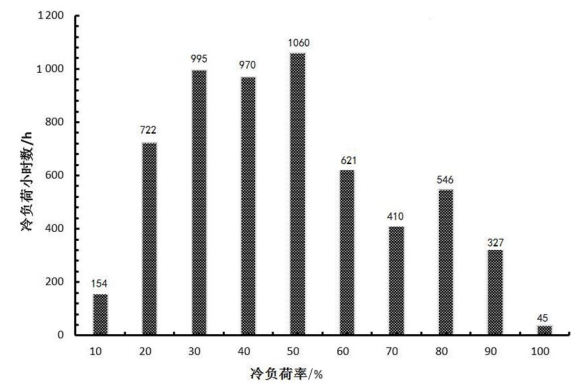


图 2 冷负荷的负荷率分布图
Fig.2 Load rate distribution of cooling load

2.2 经济性分析

冷热源的选择立足于方案的可行性和可靠性,同时满足经济、环保及能源利用率等方面,选择可行的冷热源方案进行分析^[1-3],根据动态负荷分析结果,进行了常规冷水机组、直燃式溴化锂冷水机组+常规冷水机组、基载制冷螺杆机组+双工况蓄冷机组 3 种设计方案的经济性分析比对,最终选择基载制冷螺杆机组+双工况蓄冷机组方案。

2.2.1 初投资估算

本次方案设计的初投资估算表见表 1,比较方案的设备选配及投资费用见表 2,本研究的方案 1 表示为常规冷水机组系统;方案 2 表示为直燃式溴化锂冷水机组+常规冷水机组系统;方案 3

表示为基载制冷螺杆机组+双工况蓄冷机组。25%乙二醇溶液管路及循环泵增加的费用统计已加入初投资。

表 1 空调系统方案使用的设备估算单价表
Tab.1 Estimated unit price list of equipment used in air conditioning system

序号	设备	估算单价
1	螺杆式冷水机组	600 元/kW
2	离心式冷水机组	500 元/kW
3	冷却塔	500 元/(m ³ ·h ⁻¹)
4	水泵	100 元/(m ³ ·h ⁻¹)
5	双工况冷水机组	800 元/kW
6	蓄冰槽	580 元/RTh
7	直燃式溴化锂冷水机组	1000 元/kW
8	安装费用	按设备购置费的 15%进行估算

表 2 比较方案的设备选配及投资费用
Tab.2 Equipment selection and investment cost of three comparison schemes

序号	冷源及系统辅助设备	额定能力/ kW	初投资/ 万元
方案 1	离心式冷水机组+螺杆式冷水机组	2 * 3164+ 2 * 1583	792.23

续表

序号	冷源及系统辅助设备	额定能力/ kW	初投资/ 万元
方案 2	直燃式溴化锂吸收式	2 * 1583+	937.6
	冷/热水机组+离心式冷水机组	2 * 3164	
方案 3	双工况冷水机组+基载螺杆冷水机组	2 * 3516+ 1409.4	1038.37

2.2.2 三种方案的年运行费用计算

管理费用按每天 120 元估算;人员工资按 3 人每人一天 100 元估算;折旧费按设备费用的 95%均摊到每一年;设备维修费按折旧费的 30% 进行计算;各方案系统的年运行费用如表 3 所示。

2.2.3 生命周期费用计算

生命周期费用(life cycle cost, LCC)的大小综合反映了项目初投资以及每年的运行费的情况,生命周期费用越小,项目的经济性越好^[4]。空调系统的全生命周期费用由设备初投资,运行费用及报废费用等组成。设备初投资包括设备供货费,安装调试费,设计费等。运行费用包括设备能耗费,水电费,维修保养,人员工资等费用。设备的报废费用以及各种经济性的修正,如资金利率,通胀率等。综上,空调系统的 LCC 计算公式如下:

$$LCC = IC + \sum_{k=1}^n OC * (1 + i)^k - 1 + DC * (1 + i) - n$$

(1)

式中,LCC 代表生命周期费用,单位是万元;IC 代表初投资成本单位是万元,OC 指年运行总费用,单位是万元,*i* 表示基准折现率,取 8%,*n* 表示使用寿命,取 20 a,DC 代表系统设备报废费用,单位是万元。本计算假定设备残值与拆除费用相互抵消,即 DC=0。

表 3 三种方案的年运行总费用

方	设备年	管理	人员	折旧	设备	系统运行
案	运行费用/ 万元	费用/ 万元	工资/ 万元	费/ 万元	维修费/ 万元	总费用/ 万元
1	384.9	4.38	10.95	46.30	13.89	460.45
2	515.36	4.38	10.95	56.09	16.83	603.60
3	307.21	4.38	10.95	50.99	15.22	388.75

图 3 为 3 种方案的第 *n* 年的支出费用图示,

第 *n* 年支出的费用 = $\sum_{k=1}^n OC * (1 + i)^k - 1$, *k* 在这里表示的是 1 到 *n* 的序号数。方案 3 初投资高,但每年的运行费用都比其它两个方案低。

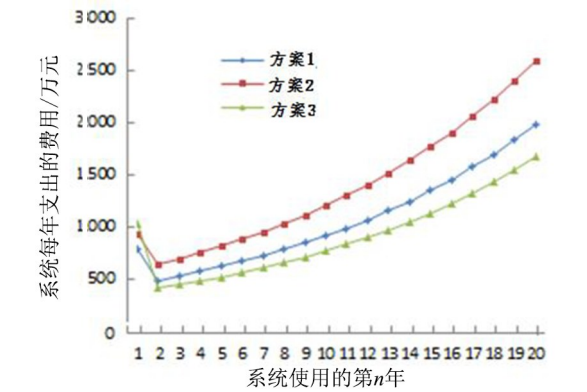


图 3 3 种方案的第 *n* 年的支出费用图示

Fig.3 Graph of expenditure of the three schemes in the *n*th year

2.2.4 分析结果

从图 3 和表 4 可以看出,双工况冷水机组+基载冷水机组方案利用了当地峰谷电价差,系统年支出的费用较低,平均的 LCC 值比方案 1 和方案 2 都低,故采用该方案。本设计选了 2 台制冷量为 3 516 kW 的双工况离心冷水机组和 2 台制冷量为 704.7 kW 的基载螺杆式冷水机组。制冷能力大、小搭配,使得制冷能力的分级与负荷变化趋势更匹配,机组也可运行在设备的高效区域。制冷机组参数见表 5。

表 4 三种方案的生命周期费用
Tab.4 Life cycle cost of the three schemes

方案	初投资/ 万元	全寿命周期 费用/万元	年均 LCC/ 万元
1	792.23	21 402.88	1 070.14
2	937.6	27 955.92	1 397.80
3	1038.37	18 439.58	921.98

表 5 制冷机组参数

机组	制冷 量/ kW	制冰 量/ kW	蒸发器		冷凝器	
			流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	水阻/ kPa	流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	水阻/ kPa
双工况	3 516	2 240	601	115	701	100
基载	704.7		121	49.6	152	53

3 冰蓄冷系统设计

3.1 设备选型

在查阅文献^[4]以及咨询过专门的冰蓄冷空调系统工程公司后,了解到一般冰蓄冷系统的蓄冰率都在 0.3 至 0.4 之间。在峰谷段电价比为 4.5 时,最佳蓄冰率为 0.33,深圳市的峰谷段电价比为 4.35,与 4.5 较为接近,故初定的蓄冰率为 0.33,根据全年动态负荷分析结果,典型设计日的累计日负荷为 92 210.901 kW·h,选取所收集资料中单个蓄冷量最大的设备,单个蓄冷量为 2 729 kW,需要 11.1 个蓄冰槽,最终选择 12 个蓄冰槽,总蓄冷量为 32 748 kW。

选定蓄冰槽后,最终的蓄冰率为 0.35。蓄冰槽总蓄冰量 = 92 210.901 * 0.35 = 32 273.82 kW·h,本设计供冷时间为 7:00 到 22:00,谷段电价时间段为 23:00 至次日 7:00,故可以在谷段电价对应时间段进行全负荷运行蓄冷,选择两台双工况机组,双工况机组蓄冰工况下的制冷量要求为 32 273.82/(8×2)= 2 017.11 kW。机型参数如表 5 所示。为该建筑冷负荷大,经过对比动态负荷计算结果发现,当系统出现蓄冰槽内冷量耗尽且需要小负荷运行时,如果开启离心式双工况机组会出现喘振现象,故需选择两台基载螺杆式冷水机组来承担小负荷工况。

3.2 蓄冰槽与双工况冷水机组的连接形式

本设计采用双工况机组与蓄冰槽串联方式,冷水机组在上游的布置方式,如图 4 所示,其优点为在释冷周期,经过空调负荷加热的高温乙二醇回水溶液先经过冷水机组冷却,然后再被蓄冰设备进一步降温。采用这种布置方式,可使冷机在较高蒸发温度下工作,有利于提高冷机的效率,双工况机组进出口温度,板式换热器两侧温度,如表 6 所示。电动阀 M2、M6 开,M4、M5 关,双工况机组直接给负荷供冷。电动阀 M4、M6 开,M2、M5 关,双工况机组向冰槽供冷,冰槽蓄冷。电动阀 M4、M2、M6 关,双工况机组停机,电动阀 M5 开,蓄冰槽向负荷供冷。电动阀 M2、M4、M5 关,M6 开,双工况机组工作,此时为联合供冷状态。

从表 6 双工况机组蒸发器进出口温度看,直接供冷或联合供冷的温度仅比单工况的制冷机组低 2℃,双工况机组的 COP 会比单工况机组的 COP 低些,耗电也会多些,但冰蓄冷的目标是在

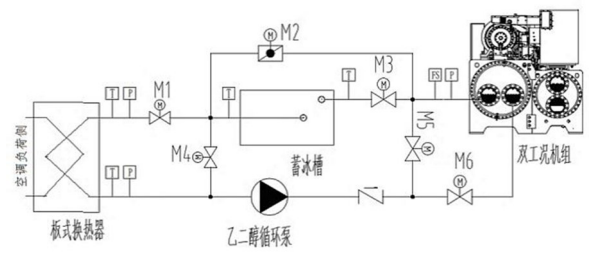


图 4 双工况冷水机组与蓄冰槽、板式换热器之间的连接方式

Fig.4 Connection mode of double working condition chiller with ice storage tank and plate heat exchanger

电价谷价期蓄冷,电价峰值期用冰蓄冷,实现电网消谷填峰,用户可以节约成本的目的。

表 6 图 4 中各设备出入口的温度要求

Tab.6 Temperature requirements of each equipment inlet and outlet in Figure 4

℃			
冰蓄冷 系统 工况	机组蒸 发器进/ 出口温度	板换 25% 乙二醇 溶液侧进/ 出口温度	板换冷冻 水侧进/ 出口温度
蓄冰	1/-6	旁通	旁通
融冰	停机	3/10	11/6
直接供冷	10/3	3/10	11/6
联合供冷	10/3	3/10	11/6

4 冰蓄冷空调系统运行策略优化

4.1 优化思路

冰蓄冷系统常用的运行方式有全部蓄冷模式和部分蓄冷模式。冷负荷高的时段也几乎是电价高的时段,在高电价时段使用冰蓄冷就是优化的目标。本建筑的运行时间为 7:00 至 22:00,运行总时间为 16 h,在峰段电价时负荷率较高,而本设计蓄冰率只有 0.35,故本设计的运行方式为部分蓄冰模式。

深圳市分时电价划分为:1 谷段(0.22 元/(kW·h)):23:00-次日 7:00;2 平段(0.70 元/(kW·h)):7:00-9:00,11:30-14:00,16:30-19:00,21:00-23:00;3 峰段(1.05 元/(kW·h)):9:00-11:30,14:00-16:30,19:00-21:00。

预测控制是一种新颖的蓄冷系统运行控制方式,它利用预测技术预测下一个蓄冷周期(通常是第二天)的冷负荷逐时分布曲线,据此决定蓄冰系统的蓄冰量,并控制白天蓄冰槽的融冰量和制冷机组的制冷能力,使其在满足冷负荷要求的基础上,最大限度地利用谷段电力,最小限度地在峰值电价期启动制冷系统,提高冰蓄冷空调的经济效益。

预测控制一般有两种方法,定性预测和定量控制。定性预测是根据过去的经验分析,对发展趋势做出预测。定量预测是采用数学、概率论和数理统计的方法对历史数据进行处理。图 5 为全年的逐日累计冷负荷,本次设计以动态负荷计算结果作为预测依据,经过数据整理分析,全年 365 d 每天的日累计冷负荷都可以查出。逐日累计最大负荷 102 834.6 kW·h,蓄冰槽总蓄冷量为 32 273.82 kW·h,除非是当天的累计冷负荷值小于蓄冰槽的蓄冷量,否则不能做到全天候蓄冰优先模式供冷。因 9:00~11:30,14:00~16:30 是峰值电价时间段,故着重考虑 7:00~17:00 的供冷模式,这是因为先考虑用完蓄冰量,再考虑直接供冷,从而达到尽可能用低价电的目的。

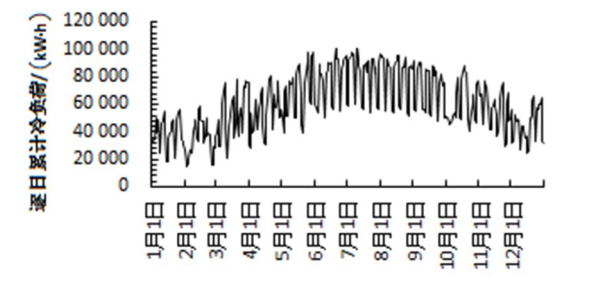


图 5 全年的逐日累计冷负荷
Fig.5 Daily accumulated cooling load of the whole year

4.2 具体优化运行策略

把模拟计算的逐日累计最大负荷 102 834.6 kW·h 作为 100% 负荷率,77 126 kW·h 作为执行 100% 负荷率设备运行切换点,51 702 kW·h 作为执行 75% 负荷率设备运行切换点,32 274 kW·h 作为执行全天融冰运行切换点。图 6 为不同负载率时的切换逻辑方框图。采用 100% 负荷率、75% 负荷率、50% 负荷率以及 32 274 kW·h 作为切换点,是因为这样可以把全年冷负荷率分成 4 种状态,有利于编排不同负荷率下设备的运

行情况。而制冷设备的加载或减载由图 4 中板式换热器的浓度为 25% 乙二醇溶液侧出口的温度控制,当浓度为 25% 乙二醇溶液侧出口温度大于 10.5℃,制冷机组将加载;当 25% 乙二醇溶液侧出口温度大于 9.5℃ 时,制冷机组将减载。当日预测的累计负荷值为负荷计算时得到全年的逐日累计冷负荷对应日的值与制冷系统测得的前一日的累计冷负荷值两者中的大值。

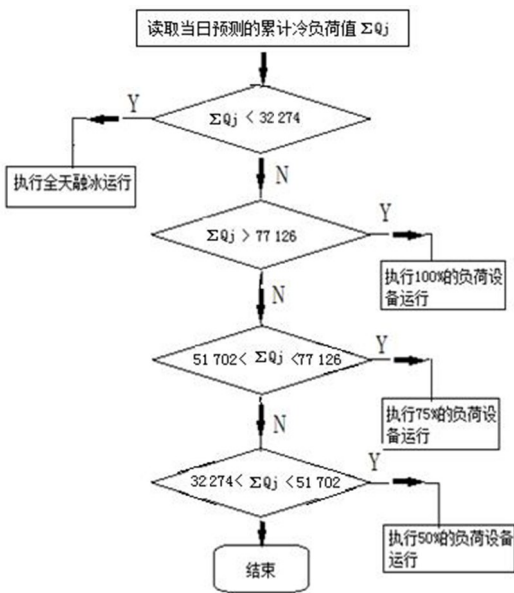


图 6 不同负载率的切换逻辑方框图
Fig.6 Switching logic block diagram of different load rates

4.3 不同负荷率下的工作模式

根据上述运行策略,图 7 为负荷率分别为全天融冰运行、50%、75%、100% 负荷率时的机组运行策略图。

以图 7(a) 100% 负荷率时的机组运行策略为例,说明制冷机组运行策略。

(1)前一天晚上 22:00 至第二天的 6:00 开启两台双工况机组,此时为系统蓄冰工况,电价为谷价段。

(2)上午 7:00~9:00 时为电价平段期,7:00 已开始给建筑供冷,使用冰蓄冷供冷,8:00 开启一台双工况离心机组,与蓄冰槽串联通过板式换热器向空调负荷供冷。此时间段的空调负荷不是负荷高点,运行的离心机是部分负荷,由板式换热器的浓度为 25% 乙二醇溶液侧出口的温度控制离心机的输出能力与蓄冰槽融冰的速率。

(3)上午 9:00~11:30 为电价高峰段,此时,

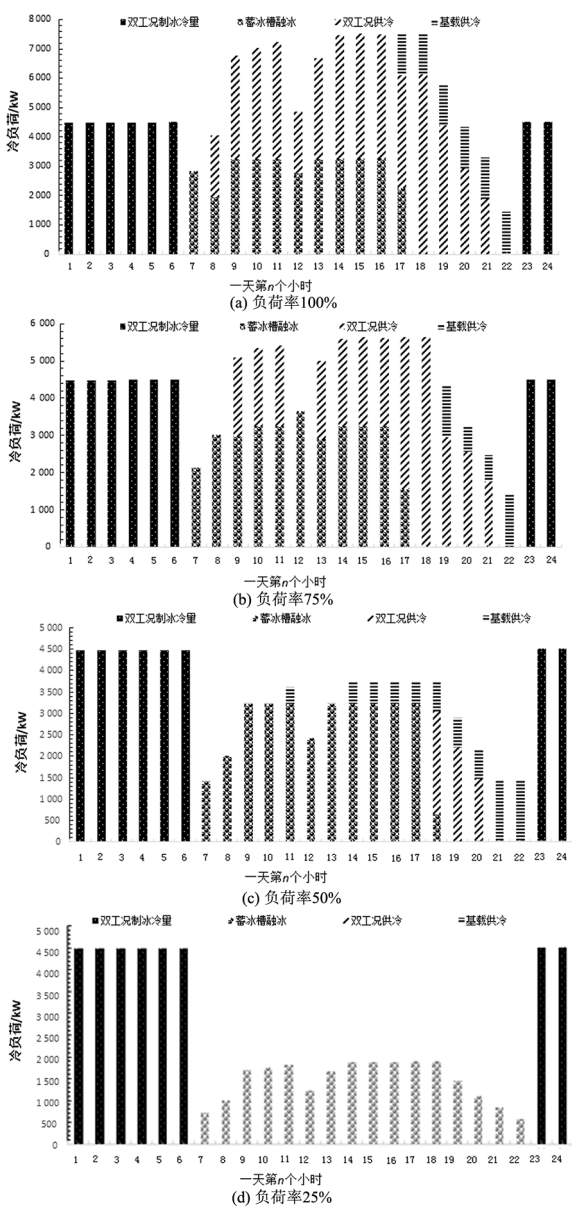


图 7 不同负荷率下制冷机组的运行策略

Fig.7 Operation strategy of refrigeration unit under different load rates

一台离心机组 100% 工作,与蓄冰槽串联通过板式换热器向空调负荷供冷,这个电价高价阶段没有

参考文献:

[1] 朱雪斌,唐朝新,李颖,等. 福建省某科技园冰蓄冷空调系统运行分析[J]. 制冷与空调, 2020, 20(11):92-95.
[2] 徐鹏,潘安东,段之殷. 冰蓄冷空调系统经济性分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1):109-116.
[3] 李兰. 某体育馆冰蓄冷空调方案经济性分析[J]. 建筑节能, 2020, 48(10):93-96.
[4] 谭亮. 义乌市某办公建筑空调系统方案优化设计与节能研究[D]. 广州:广州大学,2011.
[5] 王雯翡,吕丽娜,李晓萍,等. 北方地区某大型博物馆关键技术节能效果分析[J]. 建筑节能, 2020, 48(10):26-31.

全部由蓄冰槽提供冷量的目的就是把冰蓄冷的冷量使用的时间长些,使双工况制冷机组的负荷可以轻些,机组的 COP 提高,节约能源。

(4)下午 18:00 后,冰蓄冷冷量已经用完,由于冷负荷还较大所以必须还要开启双工况机组,到 21:00 后冷负荷越来越少时停开双工况机组,只开基载螺杆式冷水机组提供系统所需的冷量。

本建筑空调系统服务为 7:00~22:00,共 16 h。由图 7 可以看到优化的结果,在 100%、75%、50%和全融冰负荷率下,在 7:00~17:00 这个时间段蓄冰槽都能分担大部分峰价时段的冷负荷,起到较好的“削峰填谷”的效果,另外在 50%负荷率以下的情况时,在这 10 h 内都能做到双工况机组不需要开机供冷,大部分冷负荷由蓄冰槽承担;结合图 5,在负荷率 0%~50%的小时数占 67%,证明全年有 67%的时间该工程都能做到由蓄冰槽供冷为主,减少双工况冷水机组的开机时间;如果需要基载螺杆式冷水机组工作,都是设置为工作为满负荷运行的模式。双工况机组运行时尽量与冰蓄冷串连运行,使双工况机组的蒸发温度较高,从而使双工况机组的 COP 提高。

5 结语

本研究通过对运行策略的探究发现,在设计过程中不仅要考虑满足典型设计日的工况,还需分析冷热源系统全年的运行情况,做出合理的方案优化措施,制订合理的运行策略将峰值电价时段的冷负荷“转移”到谷段电价时段。本设计通过全年动态负荷结果分析预测和结合前一天的负荷作为当日的负荷预测,把 25%乙二醇溶液侧出口温度作为系统的总冷负荷变化的监测点,可以将全年逐日运行策略简化为 4 种设备的运行方案,控制较为容易实现,且需要增加的初投资较少,是结合冰蓄冷系统与全年动态负荷模拟技术的创新应用。