

# 基于负荷模拟的某综合体育馆冰蓄冷空调系统运行控制策略

## Operation Control Strategy of Ice Storage Air Conditioning System in a Comprehensive Gymnasium Based on Load Simulation

冯华晟, 黄超, 刘正扬, 谢厚旻, 姚国涛

FENG Hua-sheng, HUANG Chao, LIU Zheng-yang, XIE Hou-min, YAO Guo-tao

(中国建筑第八工程局有限公司)

(The Company of CSCEC 8th Division)

**【摘要】**综合性体育馆需兼顾比赛和赛后运营的不同需求,如果按照国际赛事标准设计空调系统,赛后运营期内活动类型 and 频率变化后必然会有较大冗余,需要根据运营需求,定制运行策略。杭州一综合性体育场馆根据赛后运营内容进行全年逐时负荷模拟,得出空调系统峰值负荷相比原设计赛事期大幅下降30%,且全年90%时间系统负荷率低于40%,采用冰蓄冷系统具备很好的经济性。在负荷预测基础上分析了不同负荷率下,冰蓄冷空调系统最佳的运行策略,为冰蓄冷系统在综合性体育场馆的应用提供了借鉴。

**【Abstract】**The comprehensive stadium needs to take into account the different needs of competition and post-competition operation. If the air-conditioning system is designed in accordance with the international standards for competitions, there will be great redundancy after the change of activity types and frequencies during post-competition operation. Therefore, it is necessary to customize the operation strategy for the operation requirements. Aiming at a comprehensive gymnasium in Hangzhou, the hourly load simulation of the whole year is carried out according to the operation content after the competition, the results show that the peak load of the air conditioning system is significantly decreased by 30% compared with the original design, and the system load rate is lower than 40% in 90% of the whole year, which proves that the ice storage system has good economy. Based on the load prediction, the optimal operation strategy of ice storage air conditioning system under different load rates is analyzed, which provides a reference for the application of ice storage system in comprehensive gymnasium.

**【关键词】**体育场馆;冰蓄冷空调;负荷模拟;运行控制策略

**【Keywords】**gymnasium; ice storage air conditioning; load simulation; operation control strategy

中图分类号: TU833; TU855

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2021.10.059

## 1 引言

国内早期体育场馆建设时主要关注赛时的使用,对赛后再利用缺乏全生命周期的设计考虑,容易造成资源闲置和浪费<sup>[1]</sup>。由于赛时赛后运营内容差别较大,体育场馆的上座率和活动频次差别也较大,导致空调系统的设计工况和实际运行工况差别较大<sup>[2-3]</sup>,因此,在建设阶段预测今后的运营状况,并根据运营需求制定相应的空调系统运行策略非常必要。

综合性体育场馆大多属于高大空间的公共建筑,冷负荷指标达到 $230\text{W}/\text{m}^2 \sim 580\text{W}/\text{m}^2$ <sup>[4-5]</sup>,能耗费用占场馆年运营收入的45.41%<sup>[6]</sup>,且同时具有瞬时人流大、峰值负荷高、部分负荷占比大的特点。冰蓄冷系统削峰填谷、运行费用低的优势恰好契合此类项目<sup>[7]</sup>。但由于冰蓄冷系统比常规空调系统结构复杂,对自控的要求也

更高,如果其运行策略或控制方法选择不当,则无法发挥移峰填谷的优势<sup>[8-9]</sup>。

## 2 项目及空调系统简介

### 2.1 建筑功能信息

杭州奥体中心体育游泳馆项目包含体育馆、游泳馆和配套商业三种业态,其中体育馆总建筑面积 $74357\text{m}^2$ ,地上五层,地下局部两层,建筑高度 $45\text{m}$ ,总座席数达到 $17348$ 个。游泳馆总建筑面积 $53959\text{m}^2$ ,地上三层,地下局部两层,建筑高度 $35\text{m}$ ,总座席数 $6484$ 个。配套商业总建筑面积 $83734\text{m}^2$ ,地上一层、地下一层。该项目建成后将作为2022年亚运会的主场馆,承担亚运会各项赛事。亚运会结束后会引入社会资源,打造成为一个集赛事、演出、文艺活动多种功能于一体的综合性体育场馆和商业中心。设计院在最初设

计时,空调设计参数按照体育场馆及亚运会赛事标准选取,但在赛后运营期内大型赛事活动频率较低,需根据日常运营活动功能进行负荷预测和计算,本项目赛时和赛后的活动详见表1。

### 2.2 空调冷热源系统简介

体育馆设计总冷负荷 $19389\text{kW}$ ,总热负荷 $10616\text{kW}$ ,冷冻水供回水温度: $4.5/14.5^\circ\text{C}$ ,热水供回水温度: $60/50^\circ\text{C}$ 。空调冷源采用串联式冰蓄冷双工况制冷系统,集中冷站内设蓄冰装置1座,蓄冰量 $103750\text{kW}\cdot\text{h}$ ( $29500\text{Rth}$ )。4台离心式双工况冷水机组,制冰工况制冷量 $10540\text{kW}$ ,制冷工况制冷量 $16880\text{kW}$ ;4台变频乙二醇冷冻水泵;6台变频冷冻水泵;6台变频冷却水泵。锅炉房内设5台燃气热水锅炉,总供热能力 $17500\text{kW}$ 。另外,由于项目紧邻钱塘江和七甲河,单独设置江水源热泵系统,给运营期时商业内部电

表1 各业态赛时及赛后活动对比表

业态	赛时功能	赛后功能
体育馆	篮球、排球、羽毛球等	篮球赛事、演唱会、综艺文化节目、发布会、企业年会等
游泳馆	游泳、跳水比赛	水上赛事演艺活动、水上体育培训、游泳健身活动
配套用房	仓储、办公等配套用房	影院、零售、餐饮等商业

影院提供独立冷热源,2台螺杆式水源热泵机组,总制冷量1400kW,总制热量1340kW,另设3台变频江水源冷冻水泵。建筑平面图及冷热源分布详见图1。

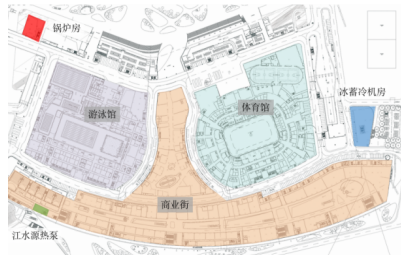


图1 建筑平面图及冷热源分布

### 3 全年空调逐时负荷模拟计算

#### 3.1 能耗模拟软件

本项目利用 Carrier E20-HAP 以及 Energyplus 能耗模拟软件,把系统中包含的体育馆、游泳馆及商业三块区域分别进行冷负荷模拟计算及综合分析,主要借助其强大的气象资料数据库和气象模拟计算功能,进行8760h的负荷估算。Energyplus 基于动态负荷理论,对包括建筑物及

相关的供热、通风和空调系统设备能耗情况进行模拟分析。主要利用其负荷模块分析模拟建筑外围护结构及其与室外环境和室内负荷之间的影响。利用系统模块和设备模块,验证和分析各项运行策略对空调系统能耗的影响。

#### 3.2 建筑模型及边界条件

建筑模型主要包括体育馆、游泳馆及商业空调区区域,通过输入建筑物所在地理位置、围护结构性能参数、建筑物内部人员、照明、电气等内部负荷以及 HVAC 设备和系统等边界条件,在软件中创建数据模型。边界条件的设定对于负荷模拟的准确性至关重要。

①建筑围护结构热工参数的选取尽量和实际相匹配,详见表2。

②室内设计参数选取尽可能按照功能空间细分,并区分赛时和赛后不同活动功能对于室内设计参数的需求。

③运营期活动的频率、活动类型等需和运营人员提前沟通确认,尽可能贴合实际。本项目经过和运营方多次沟通,确定

表2 建筑围护结构热工参数

类别	内容	传热系数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	遮阳系数	
不透明部分	屋面	0.5	-	
	外墙(包括非透明幕墙)	0.5	-	
	底面接触室外空气的架空或外挑楼板	0.56	-	
透明部分	首层两管外门窗	2.6	0.31	
	首层及地下一层预留及配套用房外门窗	无框中空玻璃幕墙	1.9	0.44
		隐框中空玻璃幕墙	1.8-1.9	2.0-2.3
		铝合金玻璃门	1.8-1.9	2.1-2.4

表3 体育游泳馆全年活动场次分布

活动类型	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
游泳馆水上表演	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
游泳馆企业活动	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
游泳馆比赛	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
体育馆演唱会	2	1	1	3	2	2	3	3	2	2	3	3
体育馆其他赛事	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
体育馆企业活动	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
体育馆冰上活动	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
体育馆CBA赛事	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0

体育游泳馆在前5年运营期每年安排活动46场,活动类型和场次分布详见表3。

④考虑不同场馆、商业的营业时间、空调开启时间、人数以及人员密度、照明及设备热扰对负荷的影响。

#### 3.3 全年空调逐时冷负荷模拟结果

对系统中包含的体育馆、游泳馆及商业区域分别进行冷负荷模拟计算及综合分析后,全年综合空调逐时冷负荷曲线如图2所示。原设计方案按照亚运会相关赛事要求设计,由于设计标准高、系统可靠性要求高,冷热负荷指标选取、主机设备选型相对冗余较大,而实际在后期运营中,空调系统峰值负荷21400kW(6091Rt)相比原设计赛事期下降30%。通过对负荷模拟结果分析可知,系统负荷率低于40%的时间占比接近90%,系统负荷率高于54%的仅有10天,系统在赛后运营期处于低负荷率下(见图3)。

### 4 冰蓄冷空调系统运行策略研究

冰蓄冷空调系统控制要解决冷负荷在制冷机组和蓄冰装置之间协调分配的问题,常见控制策略有制冷机组优先控制、融冰优先控制、定比例控制、优化控制4种方式<sup>[10]</sup>。本项目在优化控制策略的基础上,制定了冷量分配策略的总体原则。

①可靠性原则。确保系统的制冷量大于控制日逐时冷负荷预测结果。

②经济性原则。结合杭州当地峰谷电价分布,控制制冷机组和蓄冰装置在各个时段的冷负荷分配,充分利用蓄冰装置的冷量,减少电力高峰时段的用能。

③节能性原则。确保制冷机组始终运行在高效区,采用变频水泵,尽量降低管路阻力。

④稳定性原则。避免频繁的开关机

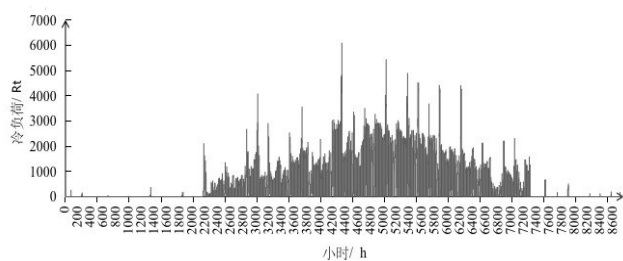


图2 全年空调逐时冷负荷分布

和模式切换,降低操作难度和频率。

#### 4.1 供冷模式类型

对于串联式冰蓄冷双工况制冷系统,共有两种运行模式:单融冰供冷模式和联合供冷模式。单融冰供冷模式下,双工况主机不启动,环路被旁通,直接通过蓄冰槽融冰向空调系统末端进行供冷。启动该模式的触发条件为:①小时冷负荷≤最大融冰速率(按12%计,即3540Rt),此时静态冰蓄冷系统按照最大融冰速率进行融冰;②日负荷不超过最大有效蓄冰量103751kW·h(29500Rt·h),联合供冷模式下,双工况制冷机串联接入系统中,冷冻水回水先经过双工况制冷机降至额定出水温度后,再经过蓄冰槽进一步降至设计供水温度后,向空调系统末端进行供冷。启动该模式的触发条件为:①小时冷负荷大于12540kW(3540Rt);②日负荷高于最大有效蓄冰量103751kW·h(29500Rt·h)。同时,需注意串联系统受双工况冷机最大流量限制。

#### 4.2 不同负荷率下,冷机与融冰供冷策略

运用前述方法,本次研究在全年空调逐时负荷10%~100%范围内,寻找出单融冰供冷和联合供冷的分界线,对于处于联合供冷的空调负荷区间,进一步分段研究冷机和融冰联合供冷的策略,即冷机开机比例和融冰量的组合策略,用以指导冷源群控程序编制达到优化运行的目的。具体结果详见表4所示。

结合负荷结果与冷水机组性能分析得出,逐时负荷小于峰值负荷的42%时,采用单融冰供冷模式即可满足使用要求;逐时负荷为峰值负荷的42%~60%时,应开启两台主机;逐时负荷为60%~86%时,应开启三台主机;逐时负荷大于86%时,应开启四台主机,可满足各负荷区间段内冷机负载率处于高COP值范围。

### 5 结语

由于多功能综合性体育场馆赛时和赛后运营内容差别较大,导致空调系统峰

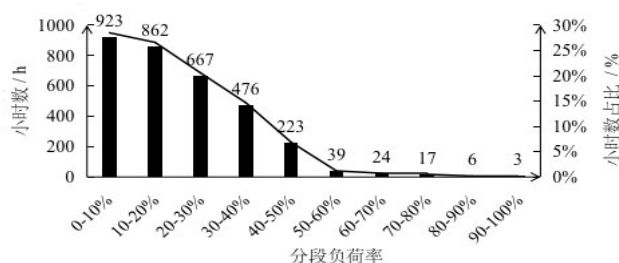


图3 供冷季负荷率分布图

值负荷相比原设计赛事期下降30%。因此,运营单位需提前介入建设阶段,根据运营需求制定空调系统运行策略。其次,体育场馆项目间歇性供能特点显著,系统负荷率<40%的运行时间接近90%,冰蓄冷系统可以很好发挥削峰填谷的优势,具有很好的经济性。再次,当逐时负荷小于峰值负荷的42%时,可采用单融冰供冷模式,其余时间采用联合供冷模式。由冷机群控系统预测负荷大小自动匹配开机台数,可确保冰蓄冷空调系统高效节能。

### 参考文献

- [1] 刘泽. 体育场馆建筑改造更新与再利用探析[J]. 艺术与设计(理论), 2019 (5): 60-61.
- [2] 陈元欣. 后奥运时期大型体育场馆运营现状问题及其发展研究[J]. 北京体育大学学报, 2012, 35(8):26-30.
- [3] 涂书阳, 王婷, 刘炜冬, 等. 体育馆使用状况调研及年负荷特征分析[J]. 暖通空调, 2017, 47(12):38-42.
- [4] 范存养. 国外大空间建筑的空调设计[J]. 暖通空调, 1996, 726(4):39-49.
- [5] 黄翔. 空调工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [6] 李艳丽. 我国大型体育场馆财务运营及对策研究[J]. 北京体育大学学报, 2013, 36(3):39-43.
- [7] 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.
- [8] 孙靖, 程大章. 基于逐时空调负荷预测的冰蓄冷优化控制策略[J]. 制冷与空调, 2004 (2):24-29.
- [9] 佟威, 阎秀英, 介军, 等. 冰蓄冷系统优化控制策略及实时控制研究[J]. 建筑节能, 2007, 35(10):1-3.
- [10] 闫华光, 石坤, 许高杰, 等. 动态冰蓄冷系统的经济最优控制策略研究[J]. 控制工程, 2016, 23(2):303-308.

表4 分段负荷率下冰蓄冷系统运行策略总表

负荷率 %	冷负荷 /Rt	融冰量 /Rt	融冰率 %	冷机总量/Rt	主机1	主机2	主机3	主机4	工况
100%	6091	2180	7.4%	3911	81%	81%	81%	81%	联合供冷
90%	5482	2180	7.4%	3302	69%	69%	69%	69%	联合供冷
86%	5238	1635	5.5%	3603	100%	100%	100%	-	联合供冷
80%	4873	1635	5.5%	3238	90%	90%	90%	-	联合供冷
70%	4264	1635	5.5%	2629	73%	73%	73%	-	联合供冷
60%	3655	1635	5.5%	2020	56%	56%	56%	-	联合供冷
57%	3472	1090	3.7%	2382	99%	99%	-	-	联合供冷
50%	3046	1090	3.7%	1956	81%	81%	-	-	联合供冷
42%	2558	1090	3.7%	1468	61%	61%	-	-	联合供冷
40%	2436	2436	8.3%	0	-	-	-	-	单融冰
30%	1827	1827	6.2%	0	-	-	-	-	单融冰
20%	1218	1218	4.1%	0	-	-	-	-	单融冰
10%	609	609	2.1%	0	-	-	-	-	单融冰