

济南奥林匹克体育中心 水蓄冷系统设计

中国中建设计集团有限公司 满孝新[☆] 张 笋
中建国际设计顾问有限公司 张建仁 蔡敬琅
北京佩尔优科技有限公司 苏 文

摘要 介绍了工程概况,分析了负荷特点。设计选用的大温差水蓄冷系统采用 2 台制冷机串联的方式实现大温差制冷,供回水温度为 3.5℃/12.5℃,蓄冷水罐有效容量为 9 000 m³,蓄冷量为 89 250 kWh。

关键词 济南奥林匹克体育中心 水蓄冷 区域供冷 设计

Chilled water storage system design for Jinan Olympic Sports Center

By Man Xiaoxin[★], Zhang Sun, Zhang Jianren, Cai Jinglang and Su Wen

Abstract Presents the general situation of the project and analyses its load characteristics. The large temperature difference chilled water storage system designed adopts two series-arranged refrigerating machines to accomplish large temperature difference cooling, the supply water temperature is 3.5℃, and the return water temperature is 12.5℃, the effective capacity of chilled water storage tank is about 9 000 m³, and the cool storage capacity is 89 250 kWh.

Keywords Jinan Olympic Sports Center, chilled water storage, district cooling, design

★ China Construction Engineering Design Group Corporation Limited, Beijing, China

①

1 工程概况

济南奥林匹克体育中心为 2009 年第十一届全国运动会的主会场,是一个综合性的大型体育场馆群,位于济南市东部燕山新区,占地约 70 万 m²,由体育场、体育馆、游泳馆、网球中心、商业建筑、地下车库及能源中心等组成,总建筑面积约 36 万 m²,其中,体育场 60 000 座,建筑面积 13 万 m²;体育馆 12 000 座,建筑面积约 6 万 m²;游泳馆 4 000 座,建筑面积约 5 万 m²;网球馆 4 000 座,建筑面积 3.6 万 m²;商业建筑面积约 6 万 m²。

设计时既要考虑功能上满足第十一届全国运动会和世界单项比赛的要求,又要考虑赛后运营的灵活性,使其能够满足举办大型文艺演出、展览等要求,且能成为济南市文化活动中心、群众健身中心及商业、文化、体育、群众休闲娱乐的基地和场所。

针对以上设计要求,在济南奥林匹克体育中心设置了独立的能源中心,采用大温差水蓄冷区域供冷方式,以最大程度地实现系统节能。

2 区域供冷方式的选择

2.1 负荷特点

按照济南市的典型气象参数,考虑围护结构窗墙、人员、灯光、设备、新风等负荷,对各建筑单体进行详细的空调冷负荷计算,得到逐时负荷分布。经计算,各场馆的空调冷负荷为:体育场 12 436 kW,体育馆 7 225 kW,游泳馆 3 970 kW,网球中心

①[☆] 满孝新,男,1969 年 6 月生,硕士研究生,硕士,高级工程师,副总工程师
100037 北京市海淀区三里河路 15 号中建大厦 A 座 9 层
(010) 88083577
E-mail: manxxx@126.com
收稿日期:2010-04-08
修回日期:2010-05-04

2 724 kW, 商业区 3 169 kW, 合计约 29 524 kW。

从使用情况看, 全国运动会一般在秋季举行, 此时各场馆使用率最高; 一般小型比赛、单项比赛、文艺演出同时使用场馆概率极小; 商业区运营及场馆维护运营常年较为稳定。

根据项目的功能定位及使用特点可知其空调冷负荷具有以下几个比较明显的特点: 夜间基本无负荷; 场馆比赛时和赛后运行时空调负荷差别大; 建筑物单体空间及面积大, 场馆内人员密度大, 空调能耗较大; 项目位于繁华的政治、商业中心, 商业建筑分布在体育场周边、中心区、游泳馆和网球中心周边, 商业价值明显, 建成后使用率较高; 场馆功能多样, 各单体建筑高峰负荷出现时间有较大差异。

在进行负荷统计时, 不仅对各单体建筑进行了详细的夏季空调冷负荷计算, 还对其进行了全年能耗分析。为了确定合理的装机容量, 统计了前几届全运会的赛程, 计算出赛时各单体建筑的最大同时使用率, 并考虑了季节特性; 仔细分析赛后同时运营的可能, 结合本工程的重要性, 总负荷取最大单体建筑负荷之和的 70%。即能源中心装机容量可按照总负荷的 70% 进行配置: $29\ 524\ \text{kW} \times 0.7 = 20\ 666\ \text{kW}$ (约为 5 900 rt)。

设计日逐时负荷分布如图 1 所示。

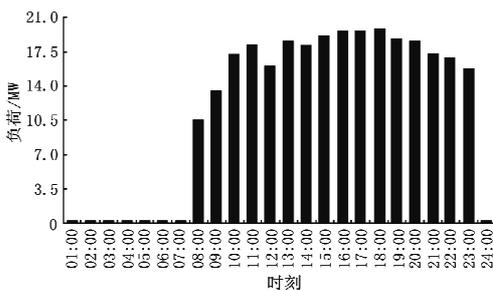


图 1 设计日逐时冷负荷分布

2.2 能源中心

本工程是由多个单体建筑构成的建筑群, 由商业建筑贯穿在一起, 建筑群相对集中。如果在每个单体建筑内分别设置制冷机房, 虽然便于独立运行, 但对单体建筑影响较大; 特别是对于狭长的商业建筑、尺度比较大的体育场, 分别设置制冷机房时, 系统的覆盖半径与只设一个能源中心的覆盖半径相差不大。

对 1 个能源中心、2 个能源中心(东、西边各设

1 个)、多个能源中心方案进行了综合分析比较, 发现采用 1 个能源中心具有较多的优点: 可以减小装机容量, 初投资较少; 可选用大型冷水机组, 大型机组 COP 高, 运行效率高; 大型冷水机组的电动机可采用 10 kV 电压直接供电, 可减小变电站的装机容量; 机组可互为备用, 提高系统的安全性; 便于集成化、专业化管理, 节约管理维护成本; 能源中心设在建筑物之外, 对单体建筑影响小, 噪声控制容易; 冷却塔只有一处, 容易与室外景观协调。

在建筑物之外单独设置一个能源中心, 从设计的角度来讲, 单体建筑内没有了制冷机房, 可简化单体建筑的设计, 加快设计进度。在只有一个能源中心的情况下, 采用大温差区域供冷系统可以达到最好的节能效果。

2.3 水蓄冷系统的选择

从本工程的负荷特点和区域供冷大温差系统考虑, 采用蓄冷技术是非常必要的。该项目设计时间为 2006 年初, 当时济南市峰谷电价为: 峰段(08:00—11:00, 18:00—23:00) 1.000 3 元/(kWh), 谷段(23:00—07:00) 0.358 1 元/(kWh), 平段(07:00—8:00, 11:00—18:00) 0.679 2 元/(kWh)。峰谷电价比约为 2.8, 蓄冷优势不是十分明显。

在此基础上, 对常规制冷系统、冰蓄冷系统、水蓄冷系统进行了比较论证。基本条件为: 负荷为 20 666 kW (5 900 rt); 末端冷水供回水温度为 5 °C/13 °C; 全年空调运行 150 d; 采用部分蓄冷方式, 蓄冷量为 89 250 kWh(25 500 rth)。

水蓄冷系统、冰蓄冷系统与常规电制冷系统的设备投资及运行费用见表 1。

表 1 设备投资及运行费用

	冰蓄冷	水蓄冷	常规电制冷
制冷机组容量/kW	14 700	11 900	20 650
机房设备用电功率/kW	3 880	3 114	5 065
机房设备配电容量/(kVA)	4 470	3 664	5 959
初投资/万元	4 787	2 448	2 810
年运行费/万元	357.33	276.67	480.12

由于采用了部分蓄冷, 水蓄冷系统在减少初投资、能耗、运行费三项基本指标上都占有绝对优势。在初投资方面, 由于水蓄冷系统装机容量减小, 水蓄冷系统比冰蓄冷系统减少 2 339 万元, 比常规制冷系统减少 362 万元。在运行费方面, 水蓄冷系统比常规制冷系统减少 203.45 万元/a, 冰蓄冷系统

比常规制冷系统减少 80.66 万元/a。水蓄冷系统装机容量比常规制冷系统减少 2 300 kVA,用电量比常规制冷系统减少 1 950 kW。

由于煤电价格矛盾,山东一度出现缺电现象。2008 年 6 月,山东省开始执行新的峰谷分时电价政策:1) 调整峰谷时段,高峰时段为 8:30—11:30 和 18:00—23:00,低谷时段为 23:00—07:00,其余时段为平段;2) 调整峰谷电价浮动比例:上下浮动 60%,即峰谷电价比约为 4.0。使得应用蓄冷系统的优势更加明显。

经分析,在本工程中采用水蓄冷系统有以下几个优点:1) 错峰运行,平衡电网负荷;2) 装机容量小于常规空调系统;3) 总用电负荷减少,减少电力装机容量;4) 减少运行费用;5) 蓄冷、释冷运行时冷水温度相同,与普通冷水机组运行模式相同;6) 运行简单,易于操作,释冷速度可依据冷负荷而定,全负荷和部分负荷运行均具有无可比拟的调节特性;7) 制冷机组可保持在高效状态运行;8) 可实现低温送风,减少水、风输送系统的投资和能耗;9) 可以储存大量冷水和冷量,提高了空调系统在重大

比赛时的安全性。

3 水蓄冷系统设计

能源中心位于整个场地的东北角,与游泳馆和体育馆相邻,由制冷机房、锅炉房、蓄冷水罐、冷却塔及相应变配电机房、值班室等组成。为减少对主体建筑的影响,便于与景观相融合,将能源中心机房、蓄冷水罐、冷却塔独立设置于半地下,形成了相对独立的一个下沉式广场(如图 2 所示),有利于机房的维护和运行。



图 2 能源中心剖面示意

制冷机房设置 4 台 3 255 kW(930 rt)的冷水机组,采用 10 kV 电压供电,为提高整体制冷效率,采用 2 台冷水机组串联运行(如图 3 所示)。冷水机组 A1 和冷水机组 B1 串联运行,冷水机组 A2 和冷水机组 B2 串联运行。第一级冷水机组 A 的标准进出水温度为 12.5 °C/8 °C,第二级冷水机组 B 的标准进出水温度为 8 °C/3.5 °C。

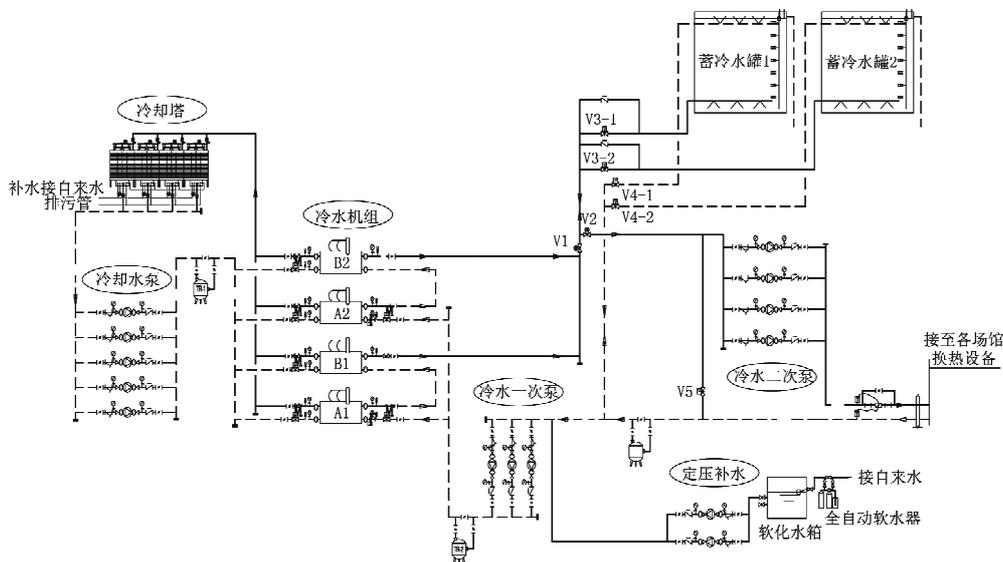


图 3 水蓄冷系统原理

设置 2 个蓄冷水罐,位于能源中心东侧。蓄冷水罐直径为 21 m,高度为 14 m,单个蓄冷水罐的有效容积约为 4 500 m³,蓄冷能力为 44 625 kWh(12 750 rth)。

济南奥林匹克体育中心建筑差异性较大,为提高系统的稳定性和安全性,在每个建筑单体内设置一个或多个冷水系统换热站,与热力系统共用,使

水蓄冷系统一次侧与用户侧空调系统相对独立。蓄冷水罐的设计液面高于水蓄冷空调系统设备及管道的最高点约 2 m,因此,蓄冷水罐可兼作水蓄冷系统的定压装置。

冷水系统采用二次泵形式:一次泵为定频泵,设 3 台(二用一备),满足冷水机组制冷及蓄冷水罐蓄冷时的流量及扬程;二次泵为变频泵,设 4 台(三

用一备),在每个用户换热站均设有压差传感器,运行时根据系统管路最不利末端的压差变化,在满足某一最不利水环路所需使用压力的条件下,通过改变二次水泵电动机的运转频率或水泵的运行台数,使水泵在高效区运行,以达到节能目的。

在室外设 4 台 700 t/h 的冷却塔;设 5 台冷却水循环泵,四用一备。

在冷却水和冷水系统主管道上分别设多功能水处理仪。补水系统采用软化水,软化水箱与锅炉补水共用。蓄冷水罐兼作膨胀水箱,设 2 台冷水补水泵(一用一备),根据蓄冷水罐的水位进行低位补水。

表 3 阀门及设备运行状态

工作状态	阀门 V1	阀门 V2	阀门 V3-1	阀门 V4-1	阀门 V3-2	阀门 V4-2	阀门 V5	主机	冷却塔	冷却水泵	冷水一次泵	冷水二次泵
主机单独蓄冷	开	关	开	开	开	开	关	开	开	开	开	关
蓄冷水罐单独放冷	关	开	开	开	开	开	关	关	关	关	关	开
主机单独供冷	开	开	关	关	关	关	开	开	开	开	开	开
蓄冷水罐+主机联合供冷	开	开	开	开	开	开	关	开	开	开	开	开
主机供冷+蓄冷	开	开	开	开	开	开	关	开	开	开	开	开

4.2 蓄冷水罐的运行

蓄冷水罐 1、蓄冷水罐 2 为独立运行、顺序切换。沿蓄冷水罐高度方向每隔 300 mm 设一温度监测点。

蓄冷时:先打开蓄冷水罐 1 管路的阀门,当蓄冷水罐 1 顶部的水温达到 3.5 °C 时,蓄冷水罐 1 蓄冷完毕,关闭蓄冷水罐 1 管路的阀门,打开蓄冷水罐 2 管路的阀门,当蓄冷水罐 2 顶部的水温达到 3.5 °C 时,蓄冷水罐 2 蓄冷完毕。

放冷时:先打开蓄冷水罐 1 管路的阀门,当蓄冷水罐 1 底部第一测点水温高于 5.5 °C,且底部向上第二测点的水温高于 12.5 °C 时,蓄冷水罐 1 的冷量释放完毕,关闭蓄冷水罐 1 管路的阀门,打开蓄冷水罐 2 管路的阀门,当蓄冷水罐 2 底部第一测点水温高于 5.5 °C,且底部向上第二测点的水温高于 12.5 °C 时,蓄冷水罐 2 的冷量释放完毕。

4.3 水蓄冷系统运行策略

空调制冷系统运行控制的目的是根据电力部门峰谷电价差,优化运行模式,实现削峰填谷、降低能耗、减少运行费用。

优化运行策略的手段是通过预测当天负荷率,根据峰谷电价政策,优化各时段的运行,满足全天的总冷量,且尽量减少运行费用。也就是在满足负荷需求的情况下,尽量避免在峰值电价时开启冷水

4 水蓄冷系统运行设计

4.1 水蓄冷系统运行工况

水蓄冷系统主要有以下 5 种运行工况,见表 2。

表 2 水蓄冷系统运行工况

工况	需求	工作状态	优先运行时间段
1	蓄冷	主机单独蓄冷	23:00-07:00
2	放冷	蓄冷水罐单独放冷	08:00-11:00;18:00-23:00
3	放冷	主机单独供冷	07:00-08:00;11:00-18:00
4	放冷	蓄冷水罐+主机联合供冷	
5	蓄冷+放冷	主机供冷+蓄冷	

在 5 种运行工况中,阀门及设备运行状态见表 3。

机组。

将不同负荷率(100%,75%,50%,25%)时的最佳运行模式存储在计算机中,值班人员可根据影响负荷的因素(如场馆运营需求、季节、天气等),通过数据分析或人工选择最佳运行模式运行。

下面就常用的几种典型运行情况给出一个运行策略例子,实际上这些运行策略并不是唯一的。在夏季非比赛日最大负荷时,全天总负荷约为 274 495 kWh,蓄冷率约为 33%,此时的一种运行策略如图 4 所示。全运会比赛日最大负荷时,全天总负荷约为 219 597 kWh,蓄冷率约为 41%,此时的一种运行策略如图 5 所示。仅商业区 100%负荷运行时,全天总负荷约为 137 995 kWh,蓄冷率为 65%,此时的一种运行策略如图 6 所示。仅商业区 75%负荷运行时,全天总负荷为 103 499 kWh,蓄冷率为 86%,此时的一种运行策

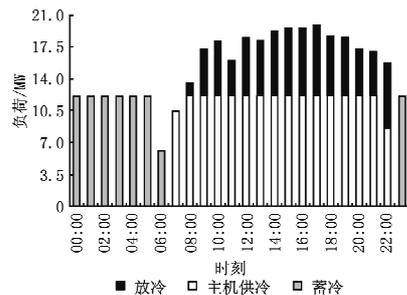


图 4 夏季非比赛日最大负荷时的运行策略

略如图 7 所示。由图 7 可以看出,当仅商业区运行、负荷率低于 75%时,本蓄冷系统可以实现全负荷蓄冷。

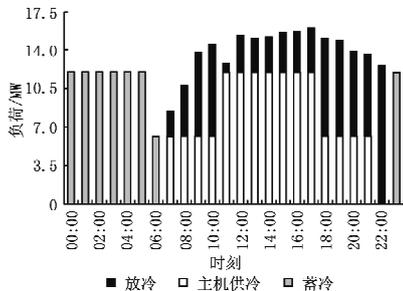


图 5 全运会比赛日最大负荷时的运行策略

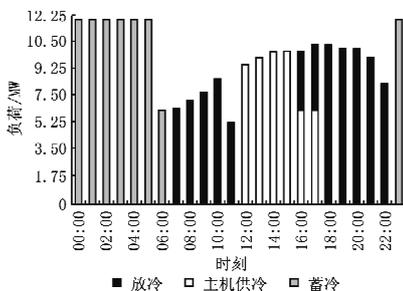


图 6 商业区 100% 负荷时的运行策略

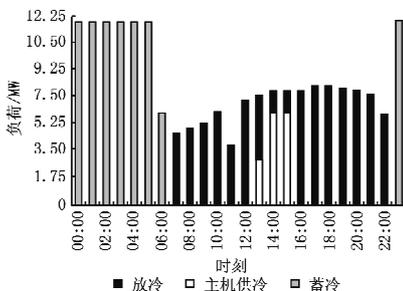


图 7 商业区 75% 负荷时的运行策略

5 设计总结

在设计之初,对济南奥林匹克体育中心进行了科学的能源规划论证,为实现项目全面系统节能奠定了基础。该工程已顺利通过了住房和城乡建设部节能省地型建筑科技示范工程、山东省节能示范工程的验收^[1]。

5.1 负荷计算。负荷计算是确定系统配置的基础。应进行设计日的逐时负荷计算,分析出现的最大负荷及最小负荷,并分析其综合使用系数,必要时进行全年能耗计算。

5.2 蓄冷温度。因受到空调回水温度的限制,水蓄冷温度即空调供水温度可在 2~8℃ 之间取

值,一般采用 4℃。水在 4℃ 左右时密度最大,软化水稍有偏差,此时比较有利于温度分层。为加大系统温差,蓄冷温度采用 3.5℃,根据文献^[2]研究成果,使用时间短于 40 h 时对蓄冷有效度影响很小。

5.3 冷水机组串联实现大温差供冷具有节能优势。要实现大温差供冷,可以直接采用大温差冷水机组,也可以采用冷水机组串联运行。采用冷水机组串联可以更节能、节电、减少运行费用。笔者就 3 325 kW 冷水机组进行了选型比较,直接采用大温差机组的电耗为 0.206 kW/kW,采用两级串联的电耗分别为 0.206 kW/kW 和 0.171 kW/kW,两级串联的电耗可减少 116 kW。冷水机组应尽量选择全负荷运行时 COP 大的机组,而不应根据综合部分负荷性能系数 (IPLV) 进行选型,因为水蓄冷工况可以让冷水机组处在全负荷状态下运行。

5.4 蓄冷水罐。本工程的蓄冷水罐为现场制作。要提高蓄冷效率,实现较好的温度自然分层效果^[3],应防止不同温度的水混合和相互干扰,控制斜温层小于 0.5 m。建议控制配水器的弗劳德数 $Fr < 0.8$,雷诺数 $Re < 1\ 500$,本工程配水器的 $Fr = 0.61$, $Re = 1\ 136$ 。同时加强蓄冷水罐保温,不仅要满足防结露要求,还要防止冷损失对温度分层的影响,减少冷损失,本工程采用了 150 mm 厚聚苯板保温。

5.5 水蓄冷系统相对复杂,为确保其可靠稳定地运行,需要设置较为完善的监测装置和自动控制系统^[4]。

5.6 该水蓄冷大温差区域供冷系统已运行近 2 年,成功保障了第十一届全运会的胜利召开,但要实现最大化的节省运行费用,还需要积累更多的运营经验数据。

参考文献:

- [1] 满孝新,沈锡骞,张建仁,等. 济南奥林匹克体育中心自然通风设计[J]. 暖通空调,2009, 39(8):29-35
- [2] 戚学贵,陈则韶. 高温水蓄冷空调系统释冷特性研究[J]. 制冷学报,2002(1):21-26
- [3] 方贵银. 空调水蓄冷温度分层动态特性研究[J]. 太阳能学报,1999, 20(3):279-283
- [4] 刘宇辉,陈文良. 济南奥体中心水蓄冷空调系统自动控制浅谈[J]. 电气应用,2009(3):70-75