

本专栏特约组稿专家 宋孝春 伍小亭

文化建筑

栏 首 语

文化是一个民族的灵魂,文化建筑可以体现一个民族深厚的历史文化底蕴。全国雨后春笋般兴建的文化建筑,显示了国家经济的富强与人民精神文明的提升。

文化建筑具有强烈的地域性、民族性和文脉性,彰显着建筑师的才华,张扬着地域文化与风土人情。博物馆储存着文明发展每个阶段的记忆,自豪着华夏子孙;图书馆积攒了文明的扇叶,奔涌着知识的海洋,承载着求知的国人远航;影剧院传播文明,可以享受视听的饕餮盛宴。

文化建筑以其功能的多样性、空间结构的复杂性与设计参数的特殊性,成为暖通空调设计师可以充分施展才华的舞台。博物馆藏品对室内温湿度的特殊要求,高大空间的气流组织及其对空间变化等的适应性,CFD 模拟技术的应用要求,低碳绿色建筑的倡导,地源热泵、蓄能空调、地道风等优化的空调系统等等,都伴随着文化建筑应运而生,是文化建筑与暖通设计碰撞后的理念与技术升华。

欣悉《暖通空调》杂志社刊出这期文化建筑专栏,希望专栏的 12 篇文化建筑空调设计文章能给暖通工程师以启迪,把我们的智慧融入这文明传承的大潮中。

(宋孝春)

中国国家博物馆暖通空调系统设计

中国建筑科学研究院建筑设计院 盛晓康[★] 董 静

摘要 介绍了国家博物馆兼顾文物保护、参观者舒适感和运行调节手段确定室内环境参数的原则。分析了采用部分负荷冰蓄冷、大温差低温冷水系统在负荷保证、提高除湿能力和节能方面的优势。结合 CFD 模拟,采用了分层空调加地板辐射供冷的空调系统以改善高大空间的室内环境。探讨了博物馆中文物库房和展厅恒温恒湿空调系统的设计方法。

关键词 节能 冰蓄冷 文物库房 展厅 恒温恒湿

Design of ventilation and air conditioning for National Museum of China

By Sheng Xiaokang[★] and Dong Jing

Abstract Considering the protection of cultural relics, visitor's comforts and operating means of regulation, presents the determination principles of indoor air parameters. Analyses the part load ice storage and large temperature difference chilled water system in the building, which is considered to be advantageous in ensuring sufficient cooling capacity for the load, improving the dehumidification capacity and reducing energy consumption. According to the CFD simulation results, adopts the stratified air conditioning system and floor panel cooling system to improve the indoor environment in the large space area. Discusses the constant temperature and humidity system design in relic storage room and exhibition hall.

Keywords energy efficiency, ice storage, relic storage room, exhibition hall, constant temperature and humidity

①

1 工程概况

中国国家博物馆(见图 1)位于天安门广场东侧,设计保留原有老馆建筑中的北、南、西侧部分立面建筑 35 000 m²,将其余部分拆除,改扩建成 191 900 m² 新的国家博物馆。其建筑空间形式丰

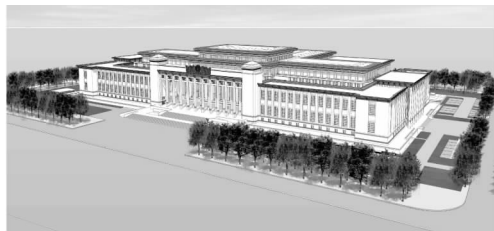


图 1 中国国家博物馆效果图

富,内部功能复杂、多样,包括 15 345 m² 的地下各类文物库房 78 间、总面积为 64 800 m² 的 47 个各类展厅,还包括学术报告厅、数码影院、演播室、文物保护室、科研室、鉴赏用房和服务于观众的公共服务空间。本文重点介绍各类复杂、特殊功能空间空调系统的节能设计。

国家博物馆内部功能的复杂多样使得室内环境要求多样且严格、苛刻;空间形式的复杂多样使得空调通风的气流组织要求各不相同。与商业公共建筑不同,博物馆类建筑的文化艺术空间室内设计和装修在很大程度上限制了空调系统的末端形式。风口不仅仅是空调系统的末端,而是室内装修设计的一部分。由于工程地处天安门广场,要求从空中和所有立面都看不到任何建筑外百叶和设备。这些因素和要求从不同的方面综合作用增加了空调系统的设计难度。

2 博物馆室内设计参数的合理确定

2.1 文物库房的室内环境参数

文物保存需要恒温恒湿的环境,但是不同材质的文物需要不同的恒温恒湿环境。不同于精密仪器机房的恒温恒湿,很多文物对空气湿度变化率的要求远比对温湿度值本身更加严格,所以对文物库房的室内温湿度还提出了“日较差”的要求。所谓日较差(daily range),是指温度或湿度在全天 24 h 内变化的振幅,是全天中温度(湿度)最高值与最低值之差。例如虽然相对湿度要求是 50%±5%,看似全天相对湿度最低 45%、最高 55%就可以满足要求,但是全天湿度变化却超过了 5%日较差的要求。

根据文物材质对环境温湿度的要求,将文物库

房分为 4 类,尽管它们对文物库房内温度要求全年都是(20±1)℃,但对环境相对湿度的要求却不同,见表 1。同时文物库房还要满足环境相对湿度日波动值不大于 5%,温度日较差不大于 2℃的要求。

表 1 文物库房室内相对湿度要求

可存放的藏品材质类别		全年相对湿度范围/%
一类藏品	砖瓦、石器、玉器、石刻、陶器、瓷器、印章、徽章	40~50
二类藏品	武器、钱币、铜器、其他金属器	30~40
三类藏品	书画、拓本、油画库、文献、织绣、皮革、基藏库品、善本、古籍、过刊、报纸、外文书、文博资料、家具、漆木牙骨	50~60
四类藏品	考古挖掘品、复制品、民族文物、现代艺术品、杂项库、临时库房	45~55

2.2 博物馆展厅的室内环境参数

国家博物馆展厅数量多、面积大,科学合理地确定其室内环境参数不仅是保证文物安全、兼顾参观者舒适感的要求,同时也在很大程度上影响博物馆的运行能耗。文物的展示不同于保存,除了以文物材质类型为题进行的专题展览外,一般文物展陈并非只展出单一材质文物,同时展厅环境还要兼顾参观者的舒适感。考虑绝大多数的文物对温度本身并不敏感,所以没有像西方国家博物馆那样将所有展厅室内温度全年控制在(22±1)℃,而是将绝大多数的展厅室内温度根据冬夏季节不同控制在 20~26℃,见表 2。个别重要或环境敏感的文物则采用带有恒温恒湿功能的展柜方式进行展出,只有国际交流展厅全年采用同一温湿度标准。这样一种室内环境参数的确定从根本上较西方国家博物馆展厅减少了能耗需求。

表 2 展厅室内环境温湿度

	夏季展厅环境		冬季展厅环境	
	温度/℃	相对湿度/%	温度/℃	相对湿度/%
数字化展厅	26±2	55±5	20±2	45±5
展柜空调	24±1	55±5	20±1	50±5
其他	24±2	55±5	20±2	50±5

3 博物馆恒温恒湿设计

恒温恒湿房间多采用风冷恒温恒湿专用空调机组,而国家博物馆要求恒温恒湿的房间数量多、规模大,如果采用上述机组,则设备数量多、布置分

①☆ 盛晓康,男,1963 年 12 月生,本科,高级工程师
100013 北京北三环东路 30 号中国建筑科学研究院
(010) 64517367
E-mail: shengxk@cabr-design.com
收稿日期:2011-08-15

散、投资大、COP 低、噪声大、效率低、运行费用高,且建筑上也不允许如此多的室外风冷机组破坏建筑外观效果。所以设计上采用了常规空调机组,通过高可靠的集中冷热源和空调自控手段达到恒温恒湿的空调效果。

3.1 文物库房恒温恒湿空调系统

为保证文物库房室内环境的稳定,从被动设计优先的角度出发,将库房置于建筑平面中部地下 13.00 m 的深度,隔绝其与室外环境的直接热湿交换,最大程度地降低空调负荷。每间库房少量的新风既是维持同时进入库房的两名工作人员的卫生需要,也是保证库房相对走廊呈正压的措施。以水盘管再热方式替代专用机组的电再热,以干蒸汽加湿方式代替恒温恒湿专用空调机的电加湿,合理利用不同品位的能源,减少配电容量 6 000 kW,提高了博物馆综合能源利用效率。当一台空调机组负担多间室内环境要求相同的恒温恒湿文物库房时,在每间库房送风支管处设置了 1℃温升分挡调节的 0.75 kW 电再热装置。以空调机组总的回风湿度控制机组的加湿或除湿,以各库房房间的相对湿度调控电再热功率,从而达到微调相对湿度 1%~6% 的目的,满足文物藏品对湿度的苛刻要求。

3.2 展厅恒温恒湿空调系统

与文物库房不同,展厅由于有大量的参观者,负荷扰动明显。国家博物馆的展厅数量和种类多、面积大。有的专题展厅只展出同一种材质的展品,例如青铜器展厅;有的展厅则展示不同材质的展品,例如古代中国展,可能既有瓷器又有书画;还有的展厅不同时间段展出不同材质的展品,如国际交流展厅。如果所有展厅都按照最高标准、最严格的要求进行设计并运行,势必会造成空调能耗的增加。这就要求同一展厅空调系统应能够在不同的时间满足并适用多种不同室内空调环境运行。根据展品的不同、时间的不同,采用不同的运行模式才能在满足使用要求的同时,最大限度地节能。例如当展出字画时,可以实现全天的恒温恒湿运行,夜间则可以减少新风量运行;展出瓷器时则可以按照舒适性空调系统运行。

3.3 展柜空调系统

为解决同一展厅内不同材质文物所要求的室内环境不同、文物对室内环境的要求与参观者的

舒适要求不同的矛盾,在部分展厅设置了展柜空调系统,创造出展柜内空间与展厅空间微小的温湿度差别,避免为满足个别展品要求而改变或提高整个展厅室内环境的要求。展柜空调系统不设排风,仅设少量新风以维持相对展厅的微正压。这样的处理方式兼顾了两者对室内环境的不同要求,避免了空调能源的巨大浪费。根据展品的性质及对环境的要求,在非参观时间有可能停止运行展厅空调,仅运行展柜空调系统。此时需要注意的是展柜内外空间的环境差异是有限制的,通常展柜内外的温差不超过 6℃。除玻璃内外温差造成的展柜空调负荷外,还应验算展柜玻璃内外的露点温度。

展柜空调系统为所连接的展柜提供的是同样温湿度参数的展柜环境,如果不同的展品需要不同的展柜空调环境时,则需要设置带独立恒温恒湿装置的展柜。

4 高大空间的分层空调系统设计

面向天安门广场的西侧入口大厅长 270 m,高 27 m,中间宽度达到 60 m,若采用全空间、全空气空调系统,暖通空调热负荷高达 1 519 kW,冷负荷为 2 488 kW。通过 CFD 对大厅进行的温度场模拟(见图 2)得知,竖向温度梯度达到 12℃。为了减少空调运行能耗,设计采取了分层空调与地板盘管辐射空调结合的方式,所有空调装置和送回风的气流组织都在距地面 6 m 高的范围内。

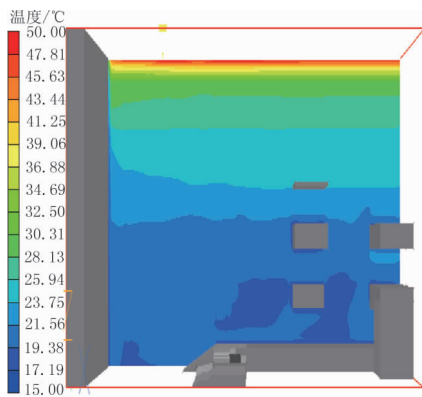


图2 西侧入口大厅夏季室内竖向温度分布

夏季当顶部区域的空气温度高于室外通风温度时,可以利用屋顶的自动窗实现自然通风或利用与消防合用的风机实现机械通风,从而在不增加空调系统冷负荷的条件下,消除顶部余热。由于靠近地面能够设置风口的位置非常有限,不得不将部分

空调负荷改由地板盘管承担。

目前国内民用公共建筑并没有大规模地在如此重要的场合使用空调冷水盘管承担室内负荷,没有太多的经验可循。地板盘管的设计首先以保证夏季地板表面不结露为原则,同时兼顾冬夏季水量一致以便利用同一套循环水泵,在此基础上计算确定水温、水盘管间距和供冷供热能力。

作为室内外过渡的入口大厅,夏季的室内设计参数为干球温度 28℃,相对湿度不大于 65%。为安全起见,要求地板表面温度应高于露点温度(20.8℃)2℃以上,即地板表面温度应不低于 22.8℃。选择不同的供回水温度及管道间距进行试算,夏季地板辐射供冷计算参数见表 3。

表 3 夏季地板辐射供冷计算参数

房间室内温度/℃	28
地下停车库温度/℃	30
制冷时楼板向下的传热系数/(W/(m ² ·K))	11
地板表面最低平均温度/℃	22.8
供水温度/℃	16
回水温度/℃	19

当盘管间距为 20 cm 时,地板表面温度满足比露点温度高 2℃的要求,以此时的供冷能力 32.5 W/m²^[1]作为设计采用的数据(见表 4),其余冷负荷则仍然需要由空气系统承担。

表 4 不同水管间距夏季供冷计算结果

管道间距/cm	10	15	20	30
向上制冷输出量/(W/m ²)	39.0	35.6	32.5	27.1
地板表面平均温度/℃	22.0	22.5	23.0	23.8
供水流量/(kg/(m ² ·h))	13.14	11.95	10.86	8.94
向下制冷损失量/(W/m ²)	6.7	6.0	5.3	4.1
总制冷输出/(W/m ²)	45.7	41.6	37.8	31.2

同样给出冬季地板盘管供热的温度条件,见表 5。

表 5 冬季地板辐射供暖计算参数

房间室内温度/℃	18
地下停车库温度/℃	5
楼板向下的传热系数/(W/(m ² ·K))	7
地板表面最高平均温度/℃	28
供水温度/℃	48
回水温度/℃	38

以此管径、间距、流量为前提,保证地表面温度不超过 28℃,以各种供回水温度试算冬季供热情况,当供回水温度为 48℃/38℃时,供热能力为 99.9 W/m²,同时地板表面温度为 27.2℃。冬季地板盘管供热情况见表 6。

表 6 不同水管间距冬季供暖计算结果

管道间距/cm	10	15	20	30
供暖输出量/(W/m ²)	126.2	112.2	99.9	79.1
地板表面平均温度/℃	29.7	28.4	27.2	25.3
供水流量/(kg/(m ² ·h))	13.58	12.18	10.95	8.88
向下热损失量/(W/m ²)	31.4	29.2	27.3	24.1
总供暖输出/(W/m ²)	157.6	141.4	127.2	103.1

为了防止夏季地板结露,设计采用了地板表面温度控制和室内空气露点控制的双重保护。即地板表面温度低于设定值时或空气相对湿度高于设定值时,意味着有结露风险,会首先停止地板盘管的冷水循环。

5 暖通空调系统的节能技术措施

5.1 被动设计减少能耗

科学合理地确定博物馆的室内环境参数,为减少不必要的空调负荷奠定了基础。为了减少室外气候及其变化对文物库房环境的影响,将文物库房设置在一 13 m 的地下室,极大地减少了文物库房围护结构的空调负荷。通过入口大厅西侧的遮阳设计大幅减小了夏季辐射得热。通过类似上述内容的被动措施,使得有大量恒温恒湿要求的博物馆夏季空调设计计算冷负荷降至 21 328 kW,包括空调再热负荷的冷负荷指标为 111 W/m²;空调设计计算热负荷降至 16 000 kW,热负荷指标为 83 W/m²;同一般公共建筑空调负荷相差不多。

5.2 合理采用能源结构,提高能源效率

热源采用市政热力,另设 2 台蒸汽锅炉(每台蒸发量 3 t/h)用于空调加湿,蒸汽锅炉在夏季可作为市政热力的备用热源以满足热力检修期间的再热需求,从而提高了博物馆热源的可靠性。

采用热水再热替代传统恒温恒湿空调的电再热,采用干蒸汽加湿替代电热加湿,避免电能再次转化为热能的低效能源利用。

5.3 冰蓄冷冷源

尽管文物库房和展厅空调系统需要每天 24 h 运行,但夜间最大空调冷负荷仅有 3 920 kW,对整个博物馆而言仍然存在较大的昼夜负荷差别,设计日昼夜空调冷负荷平衡示意如图 3 所示,结合北京地区的分时电价政策,为采用冰蓄冷作为本工程的空调冷源奠定了客观的基础条件。

设计日白天峰值冷负荷发生在 15:00,为 21 328 kW,夜间峰值冷负荷发生在 6:00,为 3 920

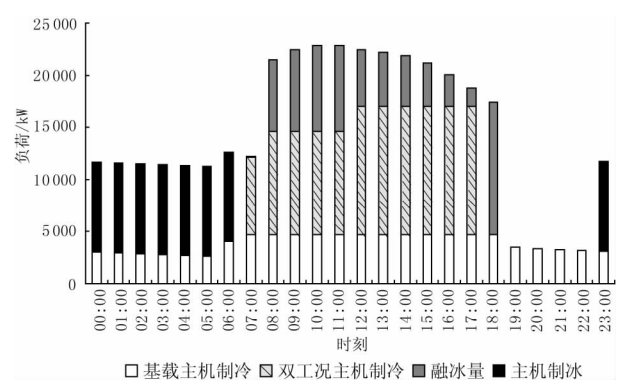


图3 典型设计日昼夜负荷平衡示意图

kW;设计日总冷负荷为285 423 kW·h,设计日总蓄冰冷负荷为184 927 kW·h。

如果采用常规空调系统,需要设置7台单台制冷量为3 165 kW(900 rt)的冷水机组,白天最高负荷时全部运行供冷,夜间只有1台机组部分负荷运行,其他6台闲置。设计采用了部分负荷蓄冰系统,4台单台制冷量为3 165 kW(900 rt)的双工况制冷主机位于系统上游并与蓄冰设备串联。同时设置3台总制冷量为4 748 kW(1 350 rt)的基载冷水机组满足夜间空调供冷,如图4所示。制冷机配置容量减少了4 748 kW(1 350 rt),年节省空调运行费用132万元,约4年时间可收回增加的蓄冰设备的投入。同时冰蓄冷可作为市电故障时的应急冷源,配合柴油发电机和水泵的工作,为博物馆提供短时间的备用冷源。主机入口冷冻液温度为10.55℃,主机出口冷冻液温度为5.5℃,蓄冰槽出口冷冻液温度为3.95℃。

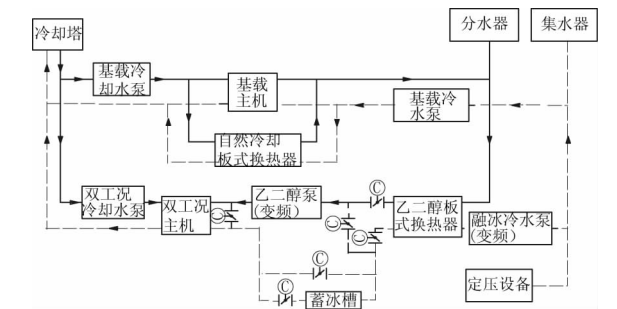


图4 蓄冰冷水系统原理示意图

5.4 低水温、大温差的空调冷水系统

博物馆采用四管制空调水系统,空调热水供水设计温度为60℃/50℃。空调冷水供回水由于采用冰蓄冷而设计为5℃/12℃。较低的水温为除湿提供了强有力的保证,而较大的温差则减少了

冷水流量近28%,不仅管径小了,阻力低了,水泵小了,管道占据的吊顶空间也相应减小。冷水泵配电容量的减小相应弥补了蓄冰系统增加的冷冻液循环泵的配电容量,使得博物馆应用蓄冰系统的优势更加突出。

5.5 冷却塔制冷与用户冷却水系统

由于博物馆空调需要常年不间断地提供空调冷水,在冬季除去以新风消除室内余热的舒适性空调外,仍然还有制冷量约2 554 kW的恒温恒湿空调系统需要冷水供应。博物馆的冷却塔制冷系统考虑到可能的除湿需求,负荷侧的冷水供水温度并不能像一般舒适性空调那样高至10℃以上。兼顾除湿要求,考虑冷却塔冷幅(冷却塔出水水温与室外湿球温度之差)1.5℃、换热温差损失1.5℃,确定当室外湿球温度低至5℃时,博物馆冷却水供冷系统可制备负荷侧8℃的冷水供水。供回水温差则依内区负荷和原有冷却水泵和冷水泵的循环流量确定为一次冷源侧3℃,二次负荷侧5℃^[2]。冬季冷却塔供冷系统温度如表7所示。

表7 冷却塔冬季供冷设计计算温度		℃
空调冷水最高供水温度 t_{L1}		8
空调冷水最高回水温度 t_{L2}		13
冷水最高供水温度,即冷却塔出水温度 t_{c1}		6.5
冷水最低回水温度,即冷却塔进水温度 t_{c2}		9.5
冷水供回水温差 $\Delta t_c = t_{c2} - t_{c1}$		3.0
冷却塔供冷负荷侧供回水温差 $\Delta t_L = t_{L2} - t_{L1}$		5.0
换热器温差较小端一二次介质温差,即换热温差 Δt_x		1.5

5.6 用户冷却水系统

虽然博物馆工程全年有不间断的冷水供应,但是考虑业主的使用方便和以后可能的改造,为保证博物馆所有外立面和屋顶不出现任何空调风冷室外机,设置了变流量的用户冷却水系统,根据负荷侧投入的设备数量和水温调节冷却水流量,为计算机房、网络数据机房、消防和安防值班室、厨房等的制冷设备提供冷却条件。

受屋顶整洁和美观的限制,冷却塔采用了下沉式布置。为保证冷却塔的通风效果和冬季运行防冻,对冷却塔通风散热进行了CFD模拟分析(见图5),确定了冷却塔的摆放方式、距障碍物间距和采用逆流形式的冷却塔,避免了冷却塔出风局部回流而影响其通风散热效果。

(上接第 5 页)

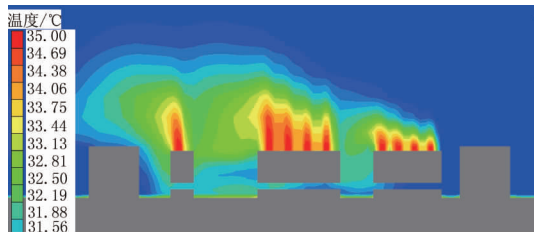


图 5 冷却塔通风散热 CFD 模拟的气流温度场分布效果

6 结语

从被动设计优先的角度出发,通过建筑设计的手段减小博物馆空调系统的负荷需求,是空调系统节能的第一步。科学、合理地确定博物馆各种文物库房、各类展厅的室内设计参数,不仅是保证文物安

全、兼顾文物保护和为参观者提供舒适环境的需要,也是博物馆节能运行的前提和基础。冷热源和空调系统形式则因地制宜,结合具体建筑物空间功能和特点以及空调的制冷、除湿、再热、加热、加湿、能量输送等要求,力争空调系统综合能效最大。国家博物馆空调系统设计的实践为博物馆、档案馆、美术馆类建筑的空调系统设计提供了良好的设计借鉴。

参考文献:

- [1] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京: 中国工业出版社, 2008: 490-495
- [2] 北京市建筑设计研究院. 北京地区冷却塔供冷设计指南[M]. 北京: 中国计划出版社, 2011