

国家体育场(鸟巢)工程设计及运行中若干问题的体会

中国建筑设计研究院 胡建丽[☆]

摘要 总结了在设计阶段、测试阶段及运行阶段的经验体会。重点介绍了全年空调负荷动态模拟、CFD 模拟热环境及风环境、空调水系统环形管网设计、临时设施的配套设计以及消防性能化设计及评估。

关键词 负荷动态模拟 环形管网 临时设施 消防性能化设计及评估

Design and operating experience of the National Stadium

By Hu Jianli[☆]

Abstract Summarizes some experiences in the design, testing and operating stages. Presents the annual air conditioning load dynamic simulation, thermal environment and wind environment simulation with CFD, loop pipeline design of the air conditioning water system, supporting design of the temporary facilities, and the fire performance-based design and evaluation.

Keywords dynamic load simulation, loop pipeline, temporary facility, fire performance-based design and evaluation

[☆] China Architectural Design and Research Group, Beijing, China

①

0 引言

国家体育场(鸟巢)作为 2008 年第 29 届奥林匹克运动会的开闭幕式及田径比赛的主体育场,从 2003 年设计之初就备受关注。体育场的暖通空调设计在严格满足《奥组委体育场馆设计大纲》、《绿色奥运设计指南》的前提下融合先进的设计理念,在确保使用功能的条件下合理利用可再生能源,选用对臭氧层无害的产品,对排风进行净化处理,尽可能地降低能耗、减少空调系统对环境的影响。

1 利用全年空调负荷动态模拟软件辅助设计

在设计中使用建筑与系统动态模拟分析软件 DeST,对体育场进行了全年 8 760 h 的逐时负荷动态模拟(见图 1、图 2)。依据负荷分布情况,分别对

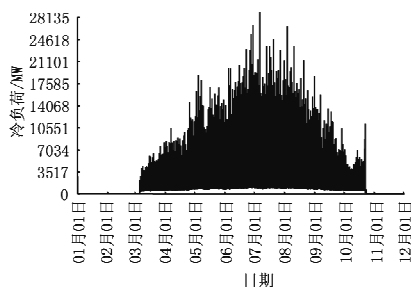


图 1 全年逐时冷负荷

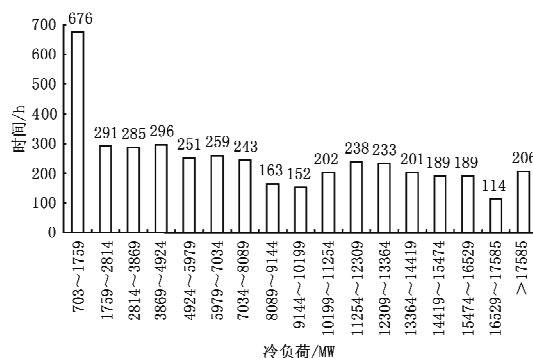


图 2 供冷季冷负荷分布时间频数

电制冷方案和热水吸收式制冷方案进行技术经济比较,包括初投资、运行费用及全寿命周期的比较,最终确定了技术可行、经济合理、运行可靠的冷热源方案。

2 利用 CFD 技术模拟场内热环境及风环境

根据温度场和速度场的 CFD 模拟结果,使用湿

①[☆] 胡建丽,女,1972 年 9 月生,大学,教授级高级工程师
100044 北京市西外车公庄大街 19 号中国建筑设计研究院
机电院
(010) 68302656
E-mail: hujl@cadg.cn
收稿日期:2009-07-14

黑球温度作为评价指标,对体育场(看台剖面见图 3)观众席和比赛区进行了热安全评价。

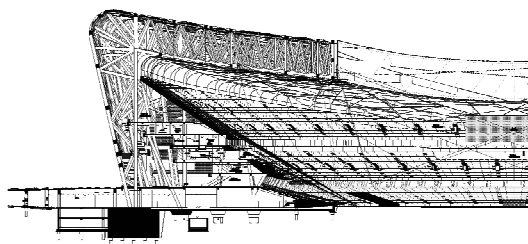


图 3 国家体育场看台剖面图

2007 年 3 月中国建筑设计研究院、清华大学建筑技术科学系等单位承担了国家体育场室内环境关键技术研究课题,其研究报告以 2008 年 8 月 8 日 20:00 的室外干球温度 25°C 作为边界条件,将计算区域各个平面的相对压力均设为 0 Pa ,仅考虑纯热压作用下的自然通风。经过模拟后自然通风效果的综合评价结论为:在典型夏季条件下以及开幕式当天,观众区、比赛区在自然通风的条件下,除局部稍热以外,其余大部分区域人员感觉热舒适,总体评价为热安全。

在 2008 年 7 月 16 日和带观众彩排的 7 月 30 日、8 月 2 日、8 月 5 日开幕式预演现场以及开幕式当天,笔者在下层看台西侧、中层看台以及上层看台尤其是 CFD 模拟计算中较不利的区域进行了实地考察,得到如下结论:

1) 开幕式表演实际灯光容量远高于永久设施的设计值,此部分金卤灯由于距离上层看台的中后部坐席较近,对人员的舒适度有一定的影响。

2) 8 月初室外温度略高于常年平均值,在最后一次近似满场的预演时,上层看台的局部区域有闷热的感觉。

3) 按照消防性能化设计要求,为了避免火灾对水平方向的影响,在上层看台膜结构的下悬与最高处看台座位区之间设置了具有不小于 1 h 耐火极限的墙体(见图 4),这也加剧了对上层看台区后 3 排的不利影响。

4) 开幕式当天采用暖云催化剂、火箭等人工消雨作业,从 18:00—23:30,持续了大约 5.5 h ,当晚 19:30 局部场区的室外温度已经上升到将近 34°C ,相对湿度大于 80% ,并且此高温情况一直持续着。另外参会人员大多盛装出席,并携带许多随身物品,座椅上还配发了观众互动的道具袋,整个坐

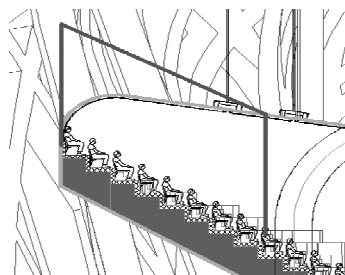


图 4 上层看台限制火荷载的区域

席区略显拥挤。

总体而言,开幕式当晚除室外气象条件与设计工况有较大的差异以外,也存在着其他的多种不利因素,这也是赛后许多设计师较为关注的一个问题,并有人提出了模拟实效性的质疑。但笔者认为 CFD 计算软件仍然是在设计阶段模拟空间内的气流速度分布、温度场分布以及热舒适、热安全评价的主要手段和重要依据。在此后的体育场馆设计过程中笔者仍然坚持采用这一技术手段辅助设计,并将模拟结果作为优化连接通道和开口位置及大小的调整依据。

但是应该引起充分重视的是边界条件参数以及内部发热量的确定需要考虑众多影响因素,然而这些影响因素在设计阶段是极不容易准确判定的,因此必要时要考虑充分的应急、备用预案及措施。

3 空调水系统环形管网设计

由于国家体育场的建筑造型以及功能的需要,在 0 层环形通道上空设计了一个封闭的环形空调供回水管网,既可提高系统运行的可靠性和灵活性,又较好地解决了系统平衡问题。

经过各方论证后在国内首次使用 $\varnothing 480\text{ mm}$ 的无缝钢管沟槽式挠性接头的管道连接环形闭合管网。并采用 $5^{\circ}, 7.5^{\circ}, 11.25^{\circ}, 22.5^{\circ}, 39^{\circ}$ 作为不同区域管线沟槽连接件角度。通过在一段管道中采用增加多个挠性接头的分散补偿的方式,国家体育场内的管道能够轻易并精确地达到所要求的安装弧度并能满足设计工况下的补偿量。

挠性接头由卡箍、橡胶密封垫圈、螺母螺栓组成,看似简单的结构却能够利用其结构空隙作为伸缩补偿的基础条件,可以有效地补偿由于热胀冷缩引起的位移;挠性接头也有利于消声、减振,并能承受一定量的振荡及摇摆形变。施工简便、所需安装空间小,可在螺栓拧紧之前进行调整消除误差,施

工时没有有害气体、液体的排放,没有火灾危险隐患。在不到两个月的时间内,极其复杂的安装环境下,国家体育场完成了 0 层绝大部分空调管道的施工安装,沟槽连接功不可没。

在环形管道的试压及运行中有以下几点值得注意:

1) 在运行中每个沟槽件根据其所在的位置、冷热工况的不同等情况,个体可能会出现合力受拉、合力受压或是合力为 0 的情况,并且此受力性质并非是一成不变的,所以受力分析相对复杂、模糊。对于个别受力点通过其表现出来的形变状态最终确定受力情况最为可靠,当然也可以参照专业设计软件进行模拟辅助设计。

2) 柔性接头可以在一定范围内偏转,在设计之初如果考虑利用这个特点完成弧形管线连接,就不应再同时利用这些管件作为吸收膨胀量之用。管路中的支吊架,固定点的位置、间距、受力分析、施工安装的可行性非常重要,这也是其安全运行的必要条件。

3) 国家体育场的 0 层环廊里管线众多,管道限位非常严格,22.5°,39°这些较大度数转角的局部位置,固定支架受力大,需采用三维立体固定支架方式,在管线交错的位置施工安装难度很大。

4) 保温材料的施工安装要严格分管段、沟槽件、阀门附件等部分分别进行,并不能将其连接为一个整体,宜考虑适当的预留,防止管线位移时引起保温材料拉伸、形变而受损,导致保温层与管道间有空气进入而出现管外壁结露的现象。

5) 沟槽连接(或者是卡箍连接)最大的通病是渗漏或者是微渗。施工操作人员对工艺不熟悉,切口不平整,橡胶圈粘有杂质,卡箍安装时受力不均匀、没有对称拧紧都是造成渗漏的主要原因。国家体育场第一次打压试验中,采用的沟槽柔性连接件没有发生泄漏现象,这一点是十分难得的。

笔者在后来的设计中也遇到了类似情况,并且曾经考虑采用一些较为传统的做法,例如:采用弯管压力平衡型补偿器;在转角角度大的位置设置耐高压型金属软管;采用折线的形式布置管道并尽可能利用自然补偿方式等等。但是上述做法都有各自的局限性,例如弯管外形尺寸较大,安装困难;软管存在较大的泄漏隐患;折线形布置在实际工程中不易实现等,尤其在圆环形走廊内设置的管线这方

面的矛盾尤为突出。现在有一种较为简单的方案,就是对于局部弧形管道全部采用刚性连接,利用特殊角度的弯头实现弧度偏转,并配合特定膨胀节来满足线位移量,这种做法在工程中也得到了一定的应用。总之,采用什么样的管线布置方案、连接方式要根据工程的实际情况、安装条件、实施的可行性综合判断确定。

4 临时设施的配套设计以及特殊人群的温度需求不容忽视

2008 年初,国家体育场大量的临时设施需求、永久设施的功能修改意见从不同的部门、渠道汇总而来,相关内容主要以开闭幕式工程需求、赛事竞赛设施需求、工艺、安保需求为主。

运行设计修改中较大部分是电气用房的增设或变更需求,例如火炬控制机房、成绩机处理机房、开幕式专用机房、临时供电的配电机房等等。这些用房大多由包间、配餐间、附属用房或室外空间改建而成,虽然是为赛时服务的临时设施,但却是开闭幕式、竞赛阶段的核心站房。为避免对永久设施的拆改与破坏,原有系统不作较大的改造,增设机房专用空调系统或变制冷剂流量变频多联机系统作为主导冷源,原有系统与增设系统存在一定量的备用关系。这些增设设备的供电、安装、管路设置、冷凝水排放、室外机的放置位置等都备受关注。已完成分部、分项竣工验收工作的区域不能因为临时设施而受到影响,这是设计者面临的现实问题,可能也是众多奥运场馆遇到的实际问题。

在一些重要区域适当地设置制冷剂备用系统或是预留土建配电条件是较好的选择。例如国家体育场的正西侧 VVIP 区域在设计之初不但设置了集中空调系统,还设置了变制冷剂多联机组作为该要员区的备用系统,在工程即将竣工时,要求该区域建筑面积扩建近 60%,这套备用系统发挥了特殊的作用,并减少了大量的返工及改造的工作量,确保了要员区室内精装修竣工的时间。

2008 年 7 月底,接到上级领导指示,要对主席台区域增设空调降温设施。此刻所有相关设施已经到位,此区域大多为进口材料或定制加工产品,改造时间不能保证。采用冷媒系统直接降温服务于室外空间时会出现水雾并会引起邻近的其他 VIP 座席观众的关注。采用风系统方案由于管线

无法实施而废弃。鉴于多方面的制约因素、经过多轮紧急磋商并实施了现场试机,最终确定在台板下面设置空调扇来缓解主席台区域的不利情况。空调扇内水槽设置冷媒液,利用直接蒸发的原理其送风温度可低于环境温度 $3\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,此温度对于年纪较大的人来说可以接受。设备运行噪声低、风量及风向可多挡调节,每个座席配备一台,便于操作,设备的有效运行时间经估算约为 $2\sim 3\text{ h}$ 。

虽然在室外空间设置空调通风系统存在诸多问题,并且这与提倡的绿色奥运理念有所出入,但不可否认的是,对于重要区域的特殊需求应给予充分的重视,或者预留相对可行的解决方案。

5 消防性能化设计成为项目不可缺少的设计依据

如今,性能化防火设计已经在许多复杂工程中得以应用,但有些设计师误认为消防性能化设计是减免防排烟系统、减少消防设施的有效途径。以下是该工程中的两个不同的场景描述。

场景 1:0 层总建筑面积近 10 万 m^2 ,除汽车库按照现行规范要求划分防火分区之外,以与室外相通的交通环廊为界,内环区为一个防火分区,外环区为一个防火分区。0 层环路面积达到 $8\,580\text{ m}^2$,层高 7.3 m ,管道安装完净高 4.5 m ,宽度 $11\sim 13\text{ m}$,中心长度超过 800 m 的交通环廊按评估结论设置机械排烟系统,防烟分区根据以疏散用核心筒为中心的原则划分,面积 $800\sim 1\,000\text{ m}^2$ 不等。总排烟量为 $80\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。

场景 2:开闭幕式活动主要集中在地面下的活动舞台及演员候场区(见图 5)。总建筑面积约 $4\,000\text{ m}^2$,层高 3.6 m 。分为舞台机械区、候场区、避难通道、台仓等几部分。其中候场区面积为 $2\,100\text{ m}^2$,避难通道宽 3.6 m ,长度近 100 m 。候场区划分 4 个防烟分区,排烟量为 $30\,000\text{ m}^3/\text{h}$,避难通道的正压送风量为 $40\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 。

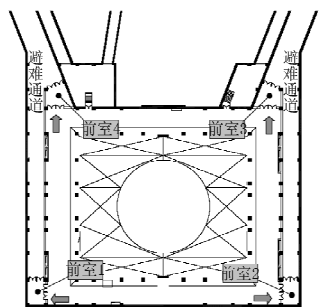


图 5 开闭幕式工程候场区、避难通道示意

由上述场景可以看出,性能化设计中的排烟系统及排烟量的确定与服务区域的面积没有必然联系,而与人员疏散到安全地点的难易程度、火灾危险性、人员密集程度、烟层临界高度、清晰高度等有密切关系。消防性能化设计是建立在火灾科学及消防工程学的基础之上,根据个体建筑物的使用功能、结构、内部可燃物等情况,对火灾危险性、危害进行定量的分析与评估。消防性能化设计是基于已明确的安全目标的设计,它与常规规范条文的规格化设计存在不同,是规范中没有涵盖或者不能适用的情况下的有力补充;同时也是综合性的设计,它从探测报警、灭火、疏散、防排烟、被动防火及援救等各方面做出最合理的方案。复杂的空间及现行规范未涵盖部分的消防设计,可以通过业主提出申请并经当地消防部门许可,进行消防性能化设计、性能化评估以及专家论证。以最终意见作为附加设计依据。

通过对于不同场景的性能化设计及评估,笔者建议在常规消防设计中为确保所设置的消防设施的有效性,应着重注意以下几点。

1) 排烟口数量的确定。排烟系统的管道及排烟口经常要给空调系统及通风系统的管道及风口让位,因此常常是面积很大的防烟分区中仅设置一个风量为几万 m^3/h 的排烟口,这样会导致排烟风机运行时排除了大量的空气,大大降低了烟气排除的有效性。

2) 排烟口设置的位置及高度应有利于形成一定高度的储烟仓,并应在清晰高度以上(一般建筑物的疏散走廊的清晰高度可以按照 1.8 m 计,房间内的可以按照 $2.0\sim 2.5\text{ m}$ 考虑),排烟口设置过低,会给人员的成功脱险带来新的困难。

3) 挡烟垂壁的高度对于烟气聚集的体积有一定影响,按照性能化设计原则,其对于排烟风机的风量也有影响,此高度严格说应该计算得出,并且不应低于清晰高度。常规设计中可以在条件允许的前提下尽可能增加挡烟垂壁的高度,形成有效的储烟仓。

4) 一个防烟分区内应采用一种排烟形式,自然排烟窗宜分散布置,排烟口的设置应远离疏散出口,使烟流方向与疏散方向相反。

以上几点是笔者在设计及施工配合中的一些粗浅体会,供大家参考,如有不妥之处敬请批评指正。