

# 天津美术馆空调系统设计探讨

天津市建筑设计院 芦岩<sup>☆</sup> 吴永乐 王砚

**摘要** 根据建筑内部空间特点,以保证工作区空调效果的空调系统节能为出发点,采用 CFD 模拟分析软件,对比研究了不同空调风系统与气流组织形式对体积较大但空间冷热负荷指标较低的高大展厅以及步进式序厅共享空间的适应性;通过对空调区域正压平衡风量的分析计算,指出了 GB 50189—2005 第 5.3.14 条关于排风热回收规定对于艺术类展览建筑的局限性。

**关键词** 美术馆 空调设计 模拟分析 气流组织

## Air conditioning system design of Tianjin Museum

By Lu Yan<sup>★</sup>, Wu Yongle and Wang Yan

**Abstract** Under the condition that the air conditioning effect in the working area is guaranteed with considering the energy saving of the air conditioning system and the feature of the interior space of the building, discusses the adaptability to the tall hall with larger space and less heat load and shares space with step-sequence halls under different air systems and different air flow patterns by CFD. After analysing and calculating positive pressure balance air volume in the air conditioned area, points out the limitation of item 5.3.14 in GB 50189—2005 when concerning heat recovery for exhaust air in art gallery buildings.

**Keywords** museum, air conditioning design, simulation analysis, air distribution

★ Tianjin Architectural Design Institute, Tianjin, China

①

### 1 建筑内部空间特点与室内空气环境要求

天津美术馆(见图 1)位于天津市河西区文化中心南部区域,总建筑面积约 2.8 万 m<sup>2</sup>,地下 1 层,地上 4 层,是典型的展览类建筑,主要房间功能为藏品库、普通展厅、珍品展厅以及办公室。建筑



图 1 天津美术馆效果图

内部空间特点及对室内空气环境的要求可概括为:

1) 建筑内部空间复杂。建筑空间由 1 层入口拾阶而上,形成高度 30 m、体积 23 000 m<sup>3</sup> 的阶梯式序厅共享空间,见图 2。图 3 为平面图。

2) 高大空间多。吊顶高度为 8 m 的展厅 2 个,建筑面积 2 000 m<sup>2</sup>;吊顶高度为 5 m 的展厅 2 个,建筑面积约为 4 000 m<sup>2</sup>。

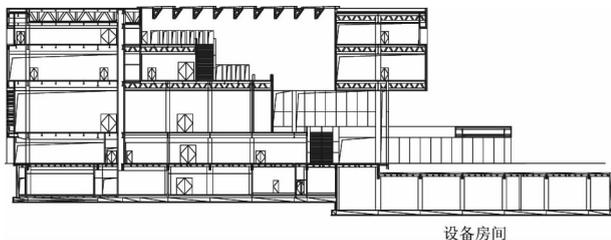


图 2 共享空间剖面图

3) 内部空间连通度高。建筑内部由步进式共享空间连接各展厅及其他房间,各空间在展览开放期间通过敞开部位形成事实上的统一空间。

4) 使用方对室内空气环境要求较高。首先为保护美术作品,对藏品库与特殊展厅提出了较高的室内空气环境设计标准,其次要求普通展厅除了满足观众的舒适性要求外,还应保证尽量减少空气途径对展品的不利影响,馆内部分空间室内设计参数见表 1。

①☆ 芦岩,男,1979 年 12 月生,研究生,工程师  
300074 天津市河西区气象台路 95 号天津市建筑设计院绿色建筑机电技术研发中心  
(022) 23543067  
E-mail:jjdianyanfa@126.com  
收稿日期:2011-08-31

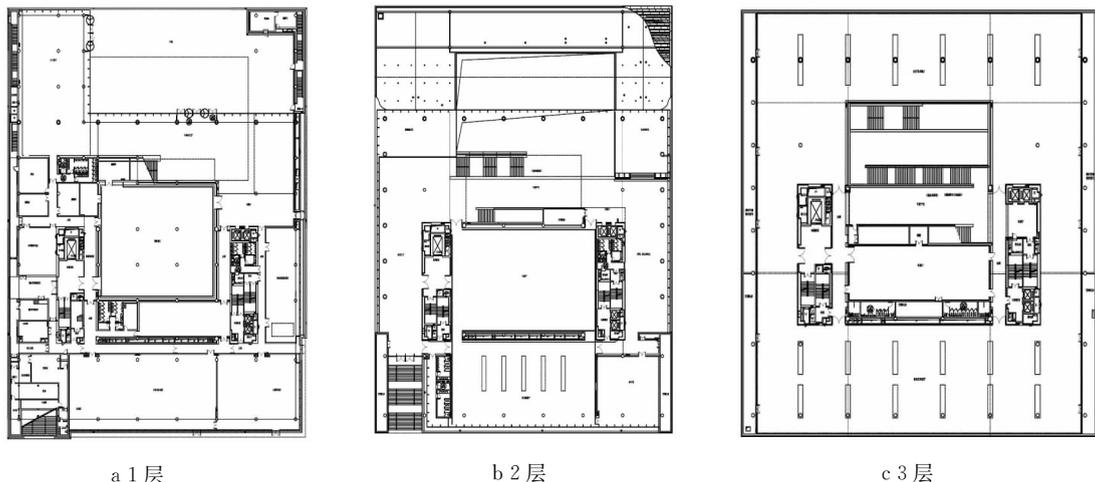


图3 共享空间平面图

表1 美术馆部分空间室内设计参数

	室内温度/℃		相对湿度/%		新风量	允许噪声标准	
	夏季	冬季	夏季	冬季		NR	A声级噪声/dB
普通展厅	26	20	50	40	20 m <sup>3</sup> /(人·h)	45	50
藏品库	20±2	20±2	50±5	50±5	10%送风量	40	45
特殊展厅	24±2	24±2	50±5	50±5	20 m <sup>3</sup> /(人·h)	35	40

5) 室内装修设计对送、回风口设置严格限制。主要指对公众开放的序厅和各个展厅,装修设计允许的送、回风口设置点均不利于空间气流组织。

## 2 空调设计的难点与解决方案

该项目空调设计面临的主要问题是:1) 一次回风系统这一展览建筑展厅空间惯用的空调风系统形式是否适合该建筑展厅的空间特点与冷热负荷特征? 2) 1~4层的步进式序厅共享空间采用阶梯式送风口能否在冷、热两个工况均能实现理想的工作区空调效果? 3) 与室外相邻的室内连续空间能否实现满足要求的正压,其保证正压的渗出风量值是多少? 这关系到该项目执行 GB 50189—2005《公共建筑节能设计标准》中关于排风热回收的强制性条文的合理性判断。

针对以上问题,通过计算和 CFD 模拟分析,设计时提出了合理的空调设计方案,简要介绍如下。

### 2.1 高大展厅空调风系统形式与气流组织有效性

高大展厅空调系统服务对象的空间与负荷特征是:室内净空高度较大,冷负荷指标相对不高,但热湿比较大,而由于是舒适性空调,设计师通常选择的空调风系统形式和气流组织方式为:无再热一次回风全空气系统,露点送风;旋流风口(或散流器)上送风或射流风口侧送(单侧或双

侧)。此方案的优点是系统形式简单,而且在保证实现满意的室内空气分布的前提下,系统风量较小,风机能耗低。本文以保证实现满意的室内空气分布为出发点,以室内空气特性分布指标<sup>[1]</sup>  $ADPI \geq 80\%$ 为判据,对一次回风系统的项目实用性进行分析。

#### 2.1.1 分析方法

1) 根据冷负荷计算结果,计算无再热一次回风空调系统相应的送风量及送风温度;确定室内吊顶高度为 5 m,送风气流组织形式为直片散流器顶送(室内装饰设计要求)。

2) 以计算得到的无再热一次回风空调系统送风量及送风温度作为 CFD 模拟的边界条件,模拟室内温度场,获得室内温度分布数据。

3) 根据模拟获得的室内温度分布数据,判断能否满足  $ADPI \geq 80\%$ 。如满足,则说明该项目高大空间展厅可以采用一次回风空调系统,否则,通过不断改变送风量及相应送风温度,CFD 模拟直至  $ADPI \geq 80\%$ ,据此求出最小送风量、相应的送风温度及换气次数值。

#### 2.1.2 分析工具与过程

本分析采用的模拟分析软件为 STARCCM+。表 2 给出了 CFD 分析的部分边界条件和  $ADPI$  计算结果,图 4 为两个典型送风量及相应送风温度时

表2 2层展厅 CFD 模拟分析结果

	室内设计 温度/ ℃	送风 温度/ ℃	送风量指 标/(m <sup>3</sup> / h)	送风量折合 换气次数/ h <sup>-1</sup>	ADPI/ %
一次回风空调系统	25	14	14.4	1.8	32
二次回风空调系统	25	21	40	5	78

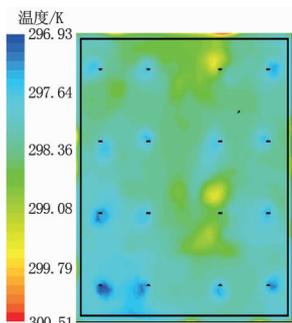
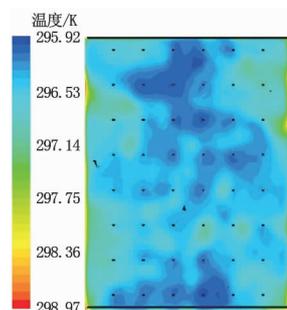
a 换气次数 1.8 h<sup>-1</sup>b 换气次数 5 h<sup>-1</sup>

图4 2层展厅 1.5 m处温度场

工作区(距地面 1.5 m 高度处)的温度分布。

### 2.1.3 计算模拟结果与分析

1) 采用无再热一次回风空调系统,送风量指标为 14.4 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h),换气次数为 1.8 h<sup>-1</sup>, ADPI=32%。

2) 当送风量指标达到 40 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)、换气次数为 5 h<sup>-1</sup>时,ADPI=78%。

3) 由以上两条可知,首先该项目不能采用无再热一次回风系统,其次最低送风量指标应≥40 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。因为,虽然从消除冷负荷、保证室内总体温度处于设计要求范围内的角度考虑,能采用无再热一次回风空调系统,但是送风量指标过小,会导致展厅内温度场与速度场不均匀,对展品不利。

4) 有再热一次回风与二次回风空调系统均可实现最低送风量要求,但前者在设计工况下会产生约 34 W/m<sup>2</sup> 的冷热抵消,而后者在空气处理

过程中几乎没有冷热抵消,与前者相比节能明显。

综上,对于该项目冷负荷指标较低的高大空间展厅采用二次回风空调系统,送风量按折合换气次数 6 h<sup>-1</sup>(为保证效果根据模拟结果增加 1 次换气)确定。

### 2.2 序厅共享空间气流组织分析

该项目的步进式序厅共享空间总高度约 30 m,形状特点如图 5 所示,为倒阶梯型。该空间内分布了 4 处位于不同标高的人员活动区域,其中 4 层共享空间人员活动区接近屋顶天窗。这一特点对共享空间的气流组织形式的确定提出了挑战,因为在这样的空间内无法形成涵盖所有人员活动区的分层空调,只能采用全室空调或分别服务不同标高人员活动区的局部空调。显然,如果能形成有效的局部空调,会比采用全室空调有明显的节能效果。问题的关键在于,图 5 所示的局部空调气流组织形式能否满足各人员活动区的热舒适要求?笔者对此进行了基于 CFD 模拟的分析。

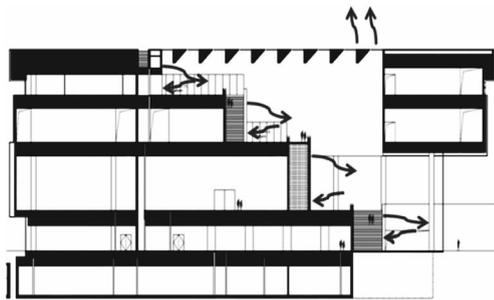


图5 共享空间局部空调气流组织示意图

#### 1) 分析思路

由于属于非人员长期停留区,因此不再以 APDI 作为空调系统效果优劣的评价指标,而以各人员活动区平均温度作为评价指标,由此确定以下分析思路:根据空调室内冷、热负荷计算,按一次回风系统确定各人员活动区送风量及送风温度,以此作为 CFD 模拟的边界条件,模拟计算各人员活动区温度场分布与平均温度,进而验证共享空间采用人员活动区局部空调气流组织的合理性。

#### 2) 分析手段

采用 STARCCM+对共享空间分层空调进行模拟分析。

### 3) 分析结果

共享空间根据人员活动区分布采用侧送侧回的局部空调气流组织形式,并且1层入口区域设置

地板辐射供暖系统,共享空间顶部设集中排风,可以保证各层人员活动区的热舒适要求。详细模拟结果见图6,7。

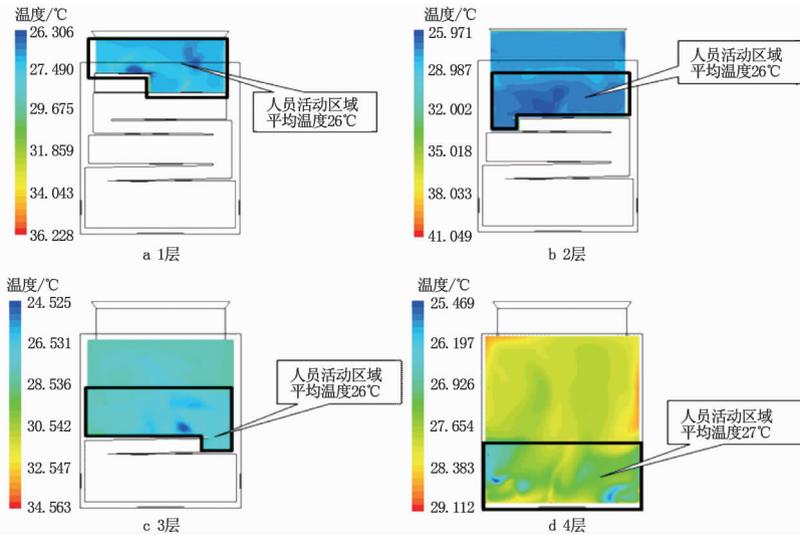


图6 各层供冷工况 1.5 m 处温度场

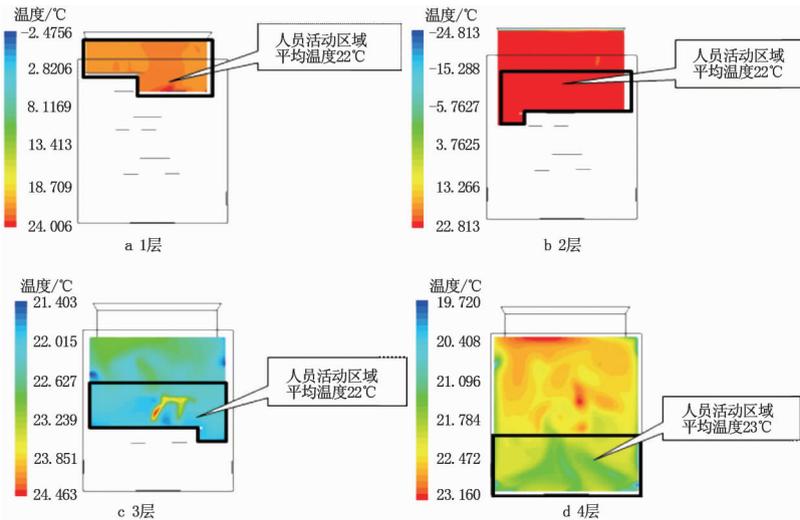


图7 各层供热工况 1.5 m 处温度场

### 4) 分析小结

① 共享空间可采用一次回风局部空调系统,各层人员活动区温度场均匀且平均温度在设计要求范围内,满足设计要求;

② 4层共享空间夏季由于热压影响,平均温度略高于设计温度,因此系统负荷计算时应考虑15%热压附加冷负荷。

### 2.3 空调排风热回收的设置

根据 GB 50189—2005《公共建筑节能设计标准》<sup>[2]</sup>第 5.3.14 条的规定,该建筑应设排风

热回收系统。该工程所有展览空间与室外连通,而作为公共建筑既不可能像工业洁净室那样,将外门窗做成高度气密性的,也不可能使大面积的外门处于相对常闭状态。由此带来的问题是:按照 GB 50019—2003《采暖通风与空气调节设计规范》<sup>[3]</sup>的规定,“舒适性空气调节,空气调节区与室外的压力差或空气调节区相互之间有压差要求时,其压差值宜取 5~10 Pa,但不应大于 50 Pa”,而该工程必须保证空气调节区与室外的压力差,以避免室外未经净化处理的

空气渗入室内而污染展品。这样为维持空调区正压所需的空气量就有可能高于空调系统的卫生新风量,在非过渡季无需设置机械排风,甚至还需增加新风量。但非过渡季进行机械排风是设置排风热回收装置的前提,所以非常有必要进行正压风量计算以确定是否需要设置排风热回收装置。

#### 1) 分析思路

根据建筑内人员所需卫生新风量与建筑整体排风量之差,计算建筑所能维持的室内正压,如果正压值大于 5 Pa,则设置排风热回收系统;如果正压值小于等于 5 Pa,则不设置排风热回收系统。

#### 2) 分析手段

采用工程计算法对室内正压值进行计算,即根据《实用供热空调设计手册》<sup>[4]</sup>有关计算方法并假想美术馆整体为有外窗、气密性较好的洁净室,然后根据建筑整体新风量与排风量之差计算所能维持的室内正压值。

#### 3) 分析结果

结果表明,建筑整体新风量仅可保证室内 1.9 Pa 的正压,因此为使展品不受室外渗入空气的污染,不设置排风热回收系统。详细计算结果为:新排风量之差 44 460 m<sup>3</sup>/h,折合换气次数为 0.277 h<sup>-1</sup>,可满足正压 1.9 Pa。

#### 4) 分析小结

① 展览类建筑一般内部体积较大,但人员密度低,导致建筑整体新风量与排风量之差折合换气次数小,人员新风量仅能维持室内微正压,因此展览类建筑不宜设置排风热回收系统;

② 排风热回收系统的设置必须结合项目具体情况,经过室内正压计算以确定是否设置。

### 3 空调系统设计方案

通过以上技术问题的分析与解决,最终形成以下技术方案。

#### 3.1 设计原则

1) 稳定性、可靠性:空调系统稳定可靠,确保展品空气环境的稳定、可靠;

2) 重视展品保护:展览区域采用全空气系统,将空调水管对展品损害的风险降至最低;

3) 气流组织合理:解决高大空间气流组织,使展品及人员区域满足设计要求。

4) 必要的正压控制:必须保证建筑整体正压,防止室外空气无组织渗入建筑,污染展品。

### 3.2 空调供暖系统设计方案简述

#### 1) 空调冷热源

空调冷热源由区域集中供冷、供热站提供,经自建换热站换热后提供单体冷热源;空调冷水一次侧供/回水温度为 3 °C/12 °C,空调冷水二次侧供/回水温度为 5 °C/13 °C,空调热水一次侧供/回水温度为 47 °C/38 °C,空调热水二次侧供/回水温度为 45 °C/35 °C。

① 备用冷热源:为确保在非集中供冷、供热期内藏品库的正常使用,该工程设置备用冷热源,冷热源为空气源热泵机组,设置于屋顶设备夹层。备用冷热源机组的制冷量/制热量为 40 kW/44 kW,空调冷水供/回水温度为 6 °C/13 °C,空调热水供/回水温度为 45 °C/35 °C。

② 冬季及过渡季冷源:舒适性全空气系统过渡季全新风运行,充分利用室外天然冷源消除室内热湿负荷。

#### 2) 空调水系统

① 采用两管制、变流量、冷热水共用型空调水系统;

② 供暖水系统与空调水系统共用换热器,在集、分水器之间分设供暖水系统与空调水系统管路,实现水系统独立控制。

#### 3) 供暖系统

① 1层办公区供暖末端系统形式为散热器供暖。

② 入口大厅供暖末端系统形式为低温地板辐射供暖。

③ 2层公共区域供暖末端系统形式为肋片型散热器。

④ 屋顶水箱间供暖末端系统形式为钢铝复合散热器。

#### 4) 空调风系统

① 大开间区域及展厅区域设全空气空调系统。

② 小开间区域采用风机盘管+新风系统。

③ 所有全空气系统均设排风机,实现过渡季全新风运行。

#### 5) 机械通风及空调系统消防

机械通风系统及空调系统消防按照相关规范及标准执行,同时消防系统设计满足消防性能化设计要求,具体形式不再赘述。

## 4 体会

4.1 因地制宜。每个项目都有其特殊性,必须结合项目的定位、功能、要求以及其他相关条件,确定系统的设计原则,只有围绕这些原则进行设计,才能充分体现设计师的设计理念。

4.2 计算机辅助设计很有必要。近年来建筑结构与功能越来越复杂,导致很多常规设计方法不能满足设计要求,必须结合计算机辅助设计进行分析与优化,因此对于设计师来说,掌握计算机辅助设计手段,是提升设计质量,实现精细化设计的必要条件之一。

4.3 勿生搬硬套规范,勤思考。设计规范是设计

师设计时遵循的依据,但规范无法涵盖所有的内容与细节,这就要求设计师根据规范提供的解决问题的思路与方法,进行思考与分析,解决实际工程问题,切不可生搬硬套规范。

## 参考文献:

- [1] 赵荣义,范存养,薛殿华,等. 空气调节[S]. 3 版. 北京:中国建筑工业出版社,2007
- [2] 中国建筑科学研究院,中国建筑业协会建筑节能专业委员会. GB 50189—2005 公共建筑节能设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005
- [3] 中国有色工程设计研究总院. GB 50019—2003 采暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2004
- [4] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2008