

阶梯型高大空间空调通风形式舒适性分析

赵浩亮*

上海松江新城投资建设集团有限公司

摘要: 本文分析阶梯型高大空间空调通风形式的舒适性, 选取寒冷地区某图书馆作为研究对象, 从送排风形式上采用以置换送风为主、混合通风为辅, 冬季辅助地暖辐射供暖的空调通风方式, 建立物理模型进行模拟, 并对其温度场、速度场、通风效率等舒适性指标进行分析, 结果表明该种空调通风形式夏季工作区垂直温差小于 3°C , 冬季温度场、速度场分布均匀, 其他指标也基本满足热舒适要求, 适用于阶梯型高大空间的空调通风设计。

关键词: 阶梯型高大空间; 空调通风; 舒适性

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.22.103

引言

随着我国经济的快速发展以及人民生活水平的提高, 全国各地大型公共建筑如博物馆、图书馆等的规模和数量也不断增加, 多数为高大空间, 为满足功能用途及美观, 各场馆的人员密集区域一般为阶梯型、大空间设计, 这些场所的气流情况、自然光照、人流热量等都与一般场所不同, 这对空调通风形式的设计增加了新的要求。由于不同阶梯的标高不同, 从而导致气流相互影响, 会出现冷热不均的情况, 这一现象在寒冷地区尤其明显。

姚军对大连某图书馆进行空调通风分析^[1], 姚喻晨对河南某图书馆阅览室的气流组织进行分析^[2]。对于高大空间的气流组织形式基本上可分为侧送下回、上送下回、下送上回等形式, 主要有混合通风和置换通风两种^[3-4], 两种通风方式各有利弊, 但单独一种通风方式在阶梯型高大空间难以满足各区域人员的舒适性。本文以寒冷地区某图书馆阅览区为例, 按照空间结构合理设置风口, 通过AirPak软件采用以置换送风为主、混合通风为辅, 冬季辅助地暖辐射供暖的通风方式分析阶梯型高大空间的空调通风的舒适性, 给暖通从业人员以参考。

一、模型的建立

(一) 物理模型及假设

本次模拟对象为某图书馆3层冬夏季空调及通风效果, 该层建筑面积 21540m^2 。鉴于该建筑规模较大, 对其整体建模进行数值计算将耗费大量计算资源, 故取其中的典型区域进行模拟。本研究关注的重点为阶梯型高大空间内部垂直温度场、速度场的变化以及通风效率等影响舒适性指标, 而建筑整体可以分为空气质量相似的四部分, 因此取建筑的约四分之一区域——如图1(建筑面积 5834平方米)进行简化建立物理模型。

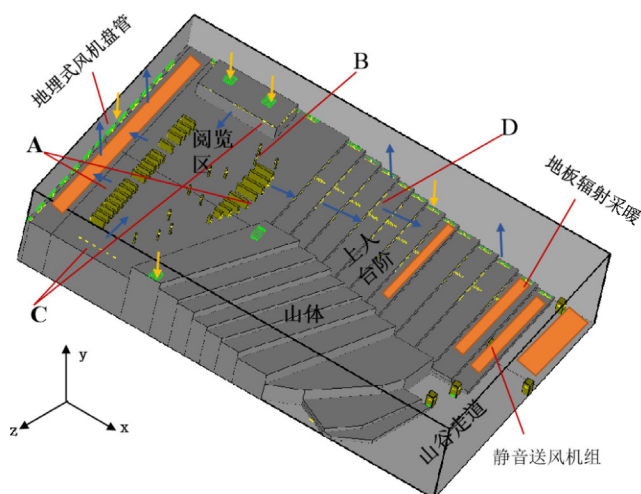


图1 物理模型及空调通风形式

采用Airpak软件建立物理模型, 如上图所示, 模型尺寸: 长度X方向 97.4m , 宽度Z方向 59.9m , 高度Y方向 20.5m , 主要分为四个区域: 山谷走道、上人台阶、山体、阅览区。阅览区位于 10.8m 高度处, 上人台阶每一级的高度为 0.9m , 共12级。

对模拟模型设置做如下假设^[5-6]:

- 1) 连续性介质;
- 2) 流动为稳定紊流;
- 3) 不可压缩的空气, 考虑重力因素, 流场具有较高的雷诺数, 流体的紊流黏性具有各向同性。

(二) 边界条件

根据空调负荷计算结果, 得到该区域夏季冷负荷为 571.89kW , 冬季热负荷为 -412.88kW 。壁面a和b均为外墙, 壁面c为地板(山谷走道), 壁面d为屋顶, 以上皆为外围护结构, 向室内传递来自外界的负荷, 因此在模型中采用定热流边界条件, 设定为wall边界; 壁面e和f为简化模型的虚拟壁面, 因此设定为对称边界(symmetry), 如图2所示。此外, 建筑内部还有大量来自人员、灯光、设备的热负荷, 本文将其按一定比例分配至人员活动区域的壁面(阅览区地面、山谷走道、上人台阶)。各边界的热流条件如表1所示。

另外对于冬季工况, 为了保证建筑内部的舒适性, 实际工程还设计了地板辐射采暖, 供回水温度为 $50^{\circ}\text{C}/40^{\circ}\text{C}$, 总供暖量为 39.6kW , 主要布置在外区(阅览区靠近外墙区域和山谷走道的靠近大门区域)和上人台阶的部分区域(见图1)。为了简化模拟, 将地板辐射采暖区域的地面设定为第二类边界条件一定热流, 经计算单位面积散热量为 $49.8\text{w}/\text{m}^2$ 。

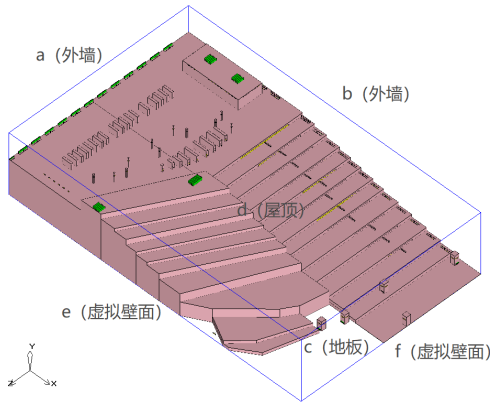


图2 维护结构

(三) 空调通风形式

基于建筑特性，为保证该区域舒适性，空调系统采用集中式全空气系统和分散式水系统，从送排风形式上以置换通风为主，混合通风作为补充。其中上人台阶段区域采用静音送风机组，采用“置换通风”；阅览区两侧采用侧送风，风速为2.5m/s，外区采用地埋式风机盘管上送风，人员停留区域送风速度控制在0.5m/s。风口布置如上图1所示，风口尺寸及送风参数见下表2。所有的送风口均设定为速度入口边界（opening），回风口设定为自由出流边界（outlet），速度损失系数选择“Approach”，送风参数与实际工程设计一致，见表2。

二、舒适性评价指标

表1 热流边界

边界名称	a	b	c	d	e	f	阅览区地面	上人台阶	
边界类型	wall				symmetry		wall		
面积/m ²	572.12	1267.8	988	5834	---		2083.7	1620	
热流密度 (W/m ²)	夏	110.56	110.56	57.34	24.29	---		45.93	
	冬	-80.85	-80.85	-9.44	-44	---		45.93	
总负荷/kW	夏	571.89							
	冬	-412.88							

表2 送风口参数

风口类型	A	B	C	D	地埋式风机盘管	静音送风机组
尺寸/(m x m)	0.6x1	0.2x0.3	0.2x0.5	0.5x0.9	0.1 x 2.8	0.2 x 0.9
风速/(m/s)	0.5	2.5	2.5	0.5	0.5	2.5
风量/(m ³ /h)	1080	2160	900	---	504	4860
送风温度/(°C, 夏)	16	16	16	20	20	16
送风温度/(°C, 冬)	27	27	27	27	27	29
总风量/(m ³ /h)	232100					

本文采用以下指标对该工程设计的空调通风性能进行主客观评价。

- 1) 速度场
- 2) 温度场

3) 吹风感。采用以下公式来计算由于吹风感引起的人体不满意度DR。对于以置换通风为主的通风系统来说，最易出现吹风感问题的情况为夏季人体脚踝高度附近区域，因此本文在y=0.1m和y=11.8m 两个高度计算其吹风感DR，评价该通风空调系统设计在夏季的舒适性。

$$DR = (34 - t_i)(u_i - 0.05)^{0.62} (0.37u_i I_i + 3.14) \quad (1)$$

式中：

t_i——为测点空气温度，°C；

u_i——为测点风速，m/s；

I_i——为测点湍流强度。

当u_i<0.05m/s时，取u_i=0.05m/s。ASHRAE55-2013推荐由于吹风感引起的不满意度不应大于20%。

4) 垂直温差。普通通风房间中温度一般并不均匀，由于空气的自然对流，温度会垂直增加。表3为国内外规范规定的工作区允许温差和工作区0.1m高度处的最低空气温度。

5) PMV——预测平均热感觉指标，代表了同一环境下绝大多数人的感觉，可以用来评价一个热环境舒适与否。PMV指标采用了如表4所示的7级分度来评价热环境的舒适性。

表3 垂直温差设计标准

规范及标准名称	GB 50736-2012	ISO 7730-2005	ASHRAE55-2013	CIBSE 2006
坐姿工作区温差 t _{0.1-1.1} =t _{1.1} -t _{0.1}	≤ 3°C	≤ 3°C	---	≤ 3°C
站姿工作区温差 t _{0.1-1.8} =t _{1.8} -t _{0.1}	---	---	≤ 3°C	---
工作区地面0.1m处 最低空气温度t _{0.1, min}	---	19-26°C	18-29°C	冬季: 20°C 夏季: 22°C

表4 PMV热感觉标尺^[7]

热感觉	热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷
PMV值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-2

6) 通风效率。通风效率采用下式计算：

$$\eta_t = \frac{t_e - t_o}{t_n - t_o} \quad (2)$$

式中：

t_e——为排风口温度，°C；

t_o ——为送风口温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_n ——为工作区平均温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

该式通常用来考察气流组织形式的能量利用有效性。下送上回的通风方式一般排风温度高于工作区平均温度，因此一般大于1，说明这类通风方式的能量利用效率较高。

三、结果及分析

(一) 速度场

图3、图4分别展示了夏季、冬季 $Z=17\text{m}$ 的速度场，速度场气流分布会直接影响其舒适性效果，结果显示整个空间的风速较低，大部分区域风速小于 0.4m/s 。

对于夏季工况，上人台阶区域风速约为 0.375m/s ，其他区域风速在 0.125m/s 左右，不会产生较强的吹流感，主要是因为置换送风由于低风速及风口特性，送风速度衰减较快。

而对于冬季工况，人员活动区速度场分布比较均匀，人员舒适性教好。这是因为冬季供热送出的热气流向上运动遇到温度较低的屋顶，而产生对流作用，导致了附近区域的风速比工作区风速大。

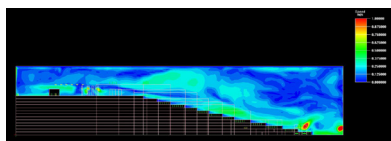


图3 夏季速度场

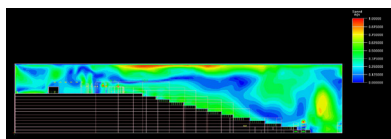


图4 冬季速度场

(二) 温度场

图5、图6分别为夏季和冬季的温度场。

夏季工况：山谷走道区域获得下沉的冷空气，温度相对较低，工作区平均温度为 22.3°C ；处于高处的阅览区的工作区温度比山谷走道略高，平均温度为 24.1°C 左右；外区平均温度为 24.5°C 左右，说明外区附近布置的地理式风机盘管能够有效排除围护结构向室内传递的巨大热负荷，将工作区温度维持在一个舒适的水平。

冬季工况：台阶下方的送风温度为 29°C ，其他区域送风温度均为 27°C ，与室内的环境空气温度的温差较小，因此热浮力的作用微弱，热空气不会迅速上升堆积在空间上部。同时地板辐射采暖的设计提高了地面区域的温度，两者的结合使用促进了大空间内的空气流动，使得整个空间内的空气混合均匀，无明显垂直温差。

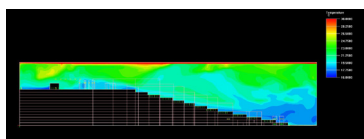


图5 夏季温度场

(三) 其他指标

其他舒适性评价指标结果如表5所示。夏季下沉的

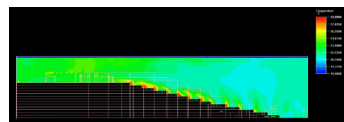


图6 冬季温度场

冷空气汇集房间底部区域，温度相对较低，并有吹流感，实际工程中上人台阶区域有桌椅等围挡，避免大量冷空气自由下沉，加上其他不可预见的负荷因素，实际工程不易出现该状况；工作区温度夏季在 $19\text{--}26^{\circ}\text{C}$ ，冬季在 $18\text{--}24^{\circ}\text{C}$ 之间；工作区垂直温差均 $<3^{\circ}\text{C}$ ，满足我国《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》（GB-50736-2012）^[8]的II级热舒适要求。

表5 舒适性评价指标

舒适性评价指标		工作区垂直温差/ $^{\circ}\text{C}$	吹风感 %	PMV	通风效率
夏季	山谷走道	1.21	32.25	0.120	1.43
	阅览区	2.63	19.43		
冬季	山谷走道	1.05	—	0.008	0.92
	阅览区	0.54	—		

结论

本文通过建立物理模型，分析阶梯型高大空间采用以置换通风为主、混合通风为辅，冬季辅助地暖辐射供暖的空调通风形式的舒适性，结果如下：

- 1) 对于夏季：最高处、最低处人员活动区域温差、工作区垂直温差均小于 3°C ，人员舒适感能够保证。
- 2) 冬季工况，整个空间的空气温度、速度分布均匀，未出现明显的垂直温差。
- 3) 该种空调通风形式基本满足热舒适要求，能量利用效率较高，适合阶梯型高大空间空调通风设计。

参考文献

- [1] 姚军. 大连市甘井子区图书馆通风空调系统设计[J]. 制冷与空调, 2015, 15(09): 60-61.
- [2] 姚喻晨. 某图书馆阶梯阅览室气流组织的设计与分析[J]. 制冷与空调, 2020, 22(09): 37-43.
- [3] 孙涛. 置换通风与混合通风系统的比较研究[J]. 节能, 2006, 289(08): 1-2.
- [4] 吴学慧, 李晓冬. 高大空间建筑置换通风系统观众席舒适性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(8): 1256-1260.
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 80-88.
- [6] 陈卓如, 王洪杰, 刘全忠, 等. 工程流体力学[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 50-56.
- [7] 朱颖心. 建筑环境学[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 58-60.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB50736-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 6-57.

作者简介: *赵浩亮(1989-), 男, 中级职称, 工程硕士。研究方向: 设计与施工管理。