



中国建筑设计院有限公司
CHINA ARCHITECTURE DESIGN GROUP

典型高大空间建筑空调通风 气流组织设计

郑 坤

2021. 04



目录

CONTENTS

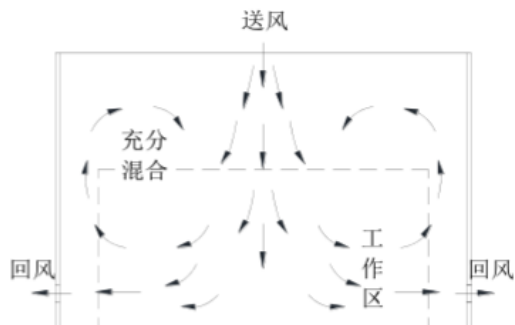
- 1 常见气流组织形式及评价
- 2 竖壁贴附射流设计实例及其节能效果
- 3 冬季气流组织问题及解决路径



01

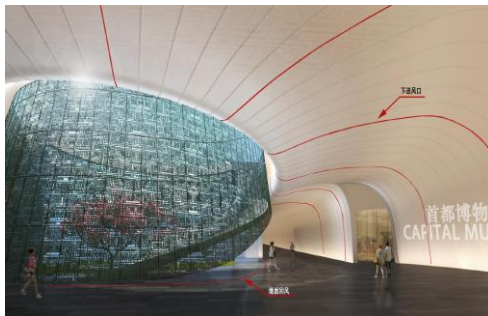
常见气流组织形式及评价

上部送风混合通风（全室空调）



气流组织示意图

建筑空调是能耗大户，在“双碳目标”背景下，应该增加对**气流组织节能**的要求，即满足相同的室内环境需求下，尽量降低末端能耗。



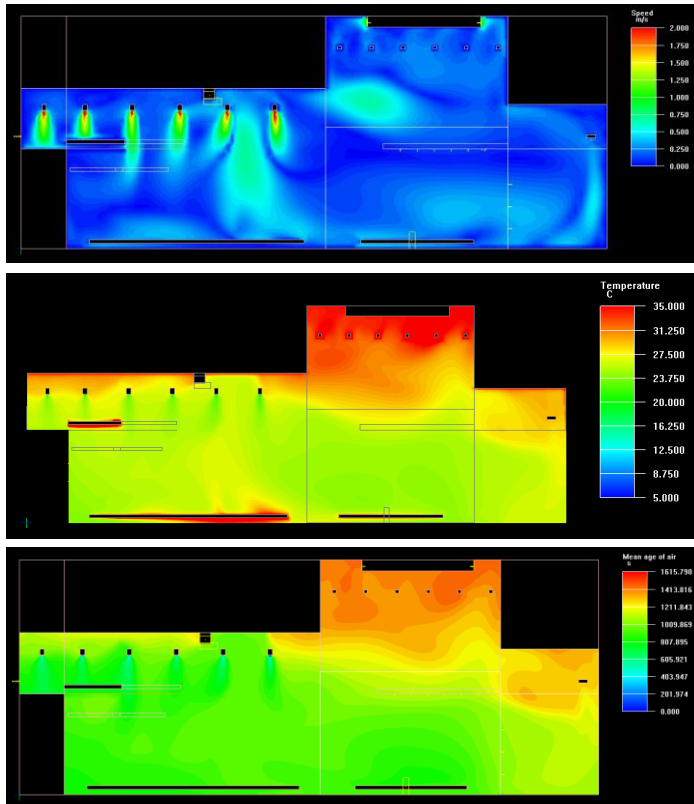
北京通州绿心地下商业（上送下侧回）



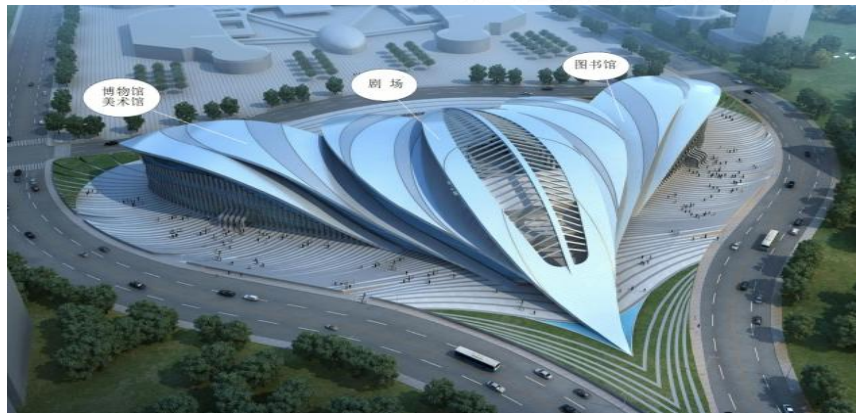
北京浦项中心（上送首层顶回）

空调通风气流组织设计的目的：使空调区内形成均匀稳定的温湿度、气流速度和洁净度，满足人体舒适的需求。

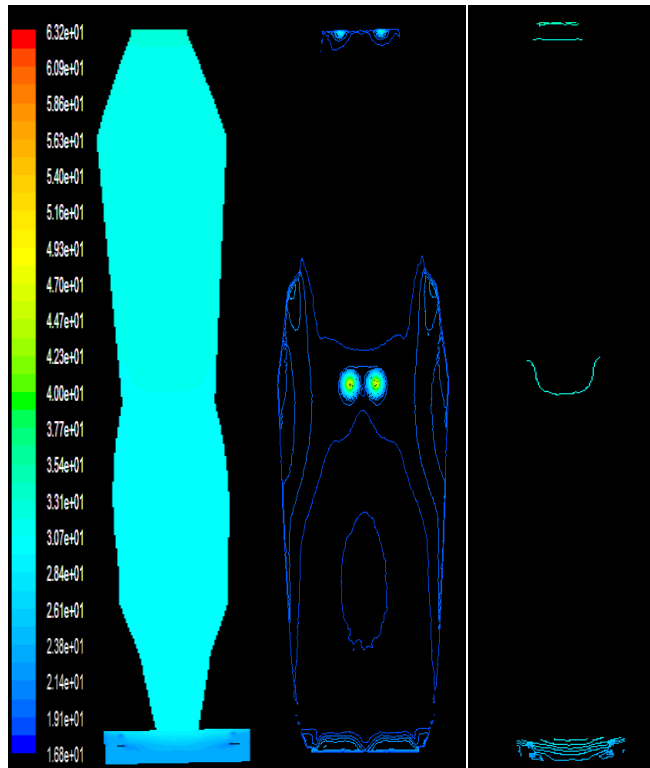
上部送风混合通风（全室空调）



泰安文化艺术中心（上送下部后侧回）
观众区换气效率0.57，上送上排0.5



- 气流组织常用评价标准：热舒适性（PMV、PPD、不均匀系数、ADPI），空气品质或污染物控制（空气龄、换气效率、通风效率），评价分层效果的指标（能量利用系数）。缺少对末端输送能耗的关注！
- 上部送风混合通风可以满足人员区的舒适性要求，一般采用CFD可以进行评价。
- 维持气流组织所需的能耗包含建筑能耗和末端输送能耗。全室空调是传统的设计形式，由于负担了整个空间的负荷，建筑能耗无折减。
- 末端输送能耗（ $Pe \propto (Q, p)$ ）体现在送风量和克服阻力上，上部送风温度可取露点温度，具有较大送风温差，风量较小。但混合通风需提供较大全压，输送能耗很大。



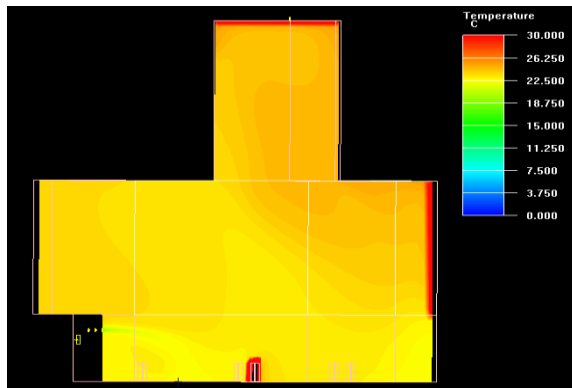
➤ **适用**高大空间，高度 $H \geq 10\text{m}$ ，建筑物体积 $V > 1\text{万m}^3$ ，空调区域高度与建筑物高度之比 $h/H \leq 1/2$ 时，这种空调方式才经济合理。

➤ 空调区域分层空调冷负荷占全室空调冷负荷的0.5~0.85，缺少数据时，取0.7。

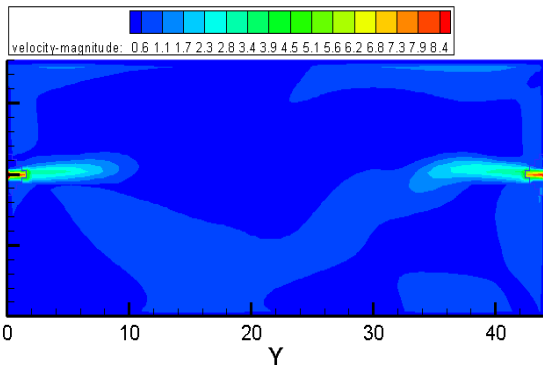
➤非空调区向空调区热转移包括辐射和对流。

➤ 中下部侧向送风混合通风在上部空间的气流组织形式包括：自然进机械排，上部无气流流动，下部部分气流进入上部机械排，中部空气幕隔绝，等等。

中下部侧向送风混合通风（分层空调）



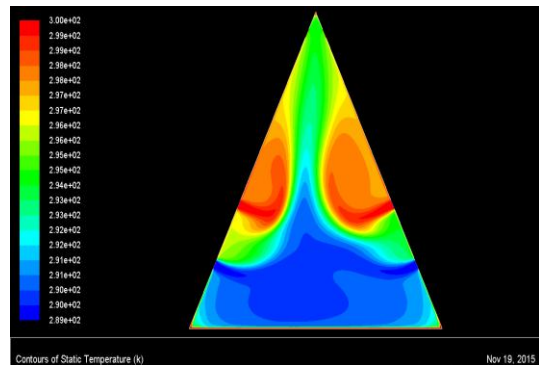
泰安文化艺术中心门厅（中部侧送下部侧回）



海口国际会展中心（中部侧送下部侧回）

➢ 实际设计中，建筑负荷取全室的0.7~0.8，没有达到理论下限值。究其原因，其一，室内正压排出气流带走部分上部负荷；其二，送风卷吸上部空间气流，负担了部分负荷；第三，上部自然通风或机械通风不畅，无法对上部散热壁面有效降温，从而对下部辐射热量较大。甚至卷吸室外空气进入下部空间，空调系统负担了过量室外新风负荷。

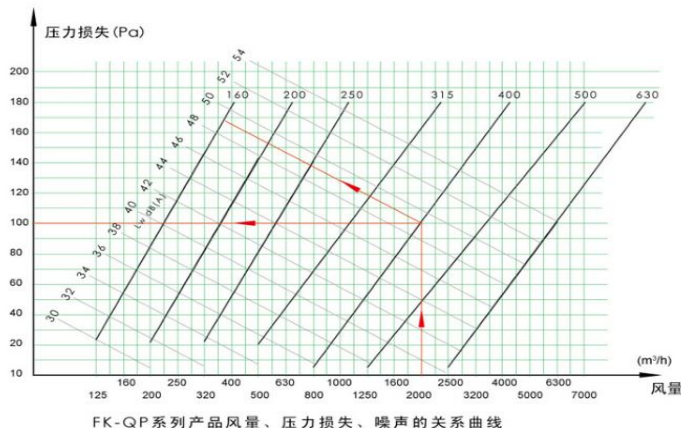
➢ 中下部侧向送风混合通风分层空调设计并未实现空调区域明显分层，反而能耗较大。主要原因为上述2和3。



亚投行方案门厅（中部侧送下部侧回）

中下部侧向送风混合通风（分层空调）

- 常用喷口作为侧向送风口，其出口风速大（不超过10m/s），湍流强度较大。 $I \propto (Re)$ ，即与特征速度和尺寸相关。湍流强度是衡量射流混合程度强弱的指标，常用脉动速度均方根值表示脉动的大小。湍流强度越大，射流与周围空气掺混作用越强，且沿着射流方向掺混作用越强，射流衰减越快。
- 喷口送风压损较大，输送能耗大；且沿程掺混作用较强，分层效果不理想，过多地负担了建筑负荷。CFD模拟一般设置出口为压力出口或速度出口，不能完全体现风口构造引起的出风湍流特性，导致模拟结果失真。相同风量，球喷出口雷诺数和湍流强度约为条形风口的25倍，压损约3倍，多负担的能耗仅仅为提供更远的射程。

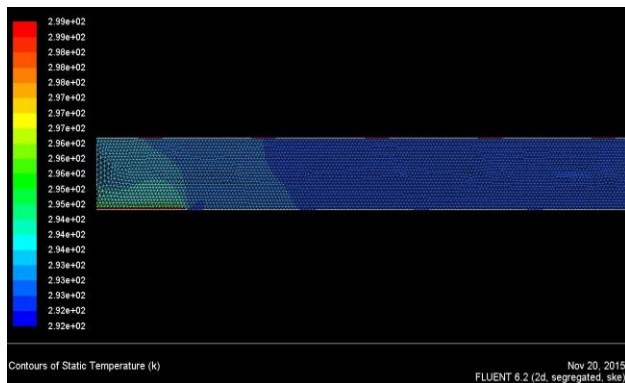
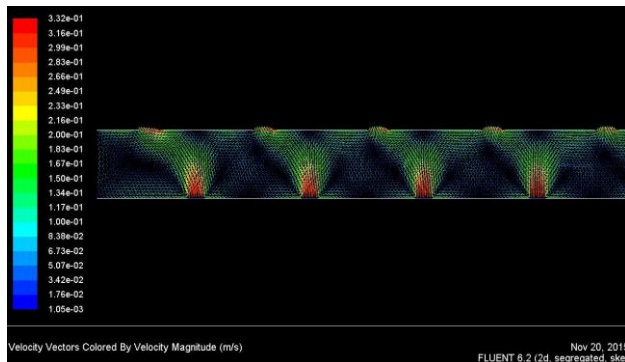
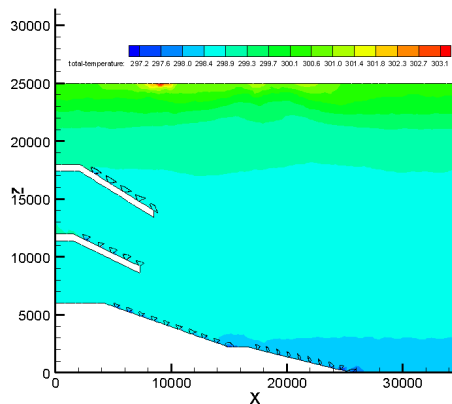
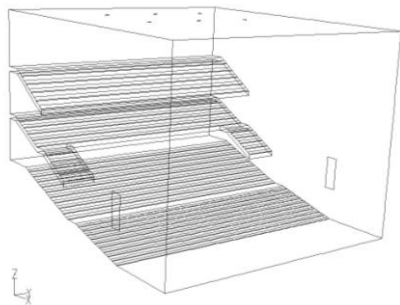


以某厂家球形喷口DN250为例，水平等温送风距离8~25m，压损20~160Pa。

规格	喉径风速m/s	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	压力损失	Pa	4.8	11	19.2	30	43	59	77	98	120
喉径宽: 72mm 0.041m²	风量CMH	Q	296	444	592	740	888	1033	1184	1328	1480
	水平送风距离m	S	2.5	3.7	5	6.2	7.4	8.4	10	11.2	12.5
	垂直送风距离m	H	2.1	3.1	4.2	5.2	6.2	7.1	8.5	9.5	10.6
	扩散半径m	Lx	1.8	2.6	3.6	4.4	5.3	6.0	7.2	8.0	9.0
	发生噪音dB(A)	Lw	25	29	33	36	40	42	44	46	48
喉径宽: 103mm 0.06m²	风量CMH	Q	432	648	864	1080	1296	1512	1728	1944	2160
	水平送风距离m	S	3.5	5.3	7	8.9	10.6	12.5	14	16	17.8
	垂直送风距离m	H	3	4.5	6	7.5	9	10.6	11.9	13.6	15.1
	扩散半径m	Lx	2.5	3.8	5.1	6.4	7.9	9.0	10	11.5	12.8
	发生噪音dB(A)	Lw	27	31	35	37.6	41.6	43.6	45.6	47.6	49.6
喉径宽: 153mm 0.082m²	风量CMH	Q	590	885	1180	1475	1770	2066	2360	2656	2950
	水平送风距离m	S	5.1	7.6	10.2	12.8	15.2	17.9	20.4	23	25.6
	垂直送风距离m	H	4.33	6.4	8.6	10.9	12.9	15.2	17.34	19.55	21.7
	扩散半径m	Lx	3.7	5.4	7.3	9.3	11.0	12.9	14.7	16.5	18.4
	发生噪音dB(A)	Lw	29	33	37	39	43	45	47	49	51

以某厂家条形风口为例，垂直送风距离3~8m（基本满足在大部分高大空间净高），喉部风速3~4m/s，压损10~20Pa。远小于喷口水平送风。

地板/座椅送风置换通风（分层空调）



- 地板/座椅送风空调区域分层良好，空气分布均匀，有较高的舒适度。
- 置换通风形式具有较好的室内空气品质，通风效率高。
- 空气直接送入人员区，送风温度不宜太低，一般19~22℃，较小的送风温差造成送风量成倍增加，增大了末端输送能耗。
- 回风/排风在上部，空调送风负担了部分上部空间负荷，室内温度梯度较小，较中下部侧向送风负担了更多的建筑负荷。

海口国际会展中心剧场（座椅送风下侧回顶部排）

亚投行方案办公区（地板送风顶部回）

常见气流组织评价

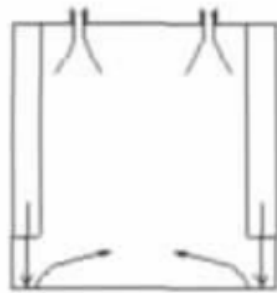
- 所有的气流组织形式在不考虑室内空气品质、能量利用效率和能耗的情况下，均能满足室内舒适性要求。
- 西安建筑科技大学的马仁民老师提出不同送风方式的换气效率如下表a，单向流的换气效率最高，置换通风次之，混合通风较低，尤其是上送上排的最低。在大空间气流组织中应避免采用上送上排的混合通风模式。
- 李琳等比较了高大空间四种气流组织的气流分布特性及能耗，见下表b。碰撞射流的热舒适度最好，空调分层即能量利用系数高，末端能耗较小，应在大空间气流组织设计中优先选择。但文中所述“碰撞射流”并非传统意义上的碰撞射流，其流型示意图见图c。在与地面碰撞转折后，其流型与壁面贴附射流近似，但竖向是管道流动。

送风方式	换气时间	换气效率
单向流	$\tau = \tau_n$	$\zeta = 1.0$
置换通风	$\tau_n < \tau < 2\tau_n$	$\zeta = 0.5 \sim 1.0$
混合通风		
上送下排	$\tau = 2\tau_n$	$\zeta = 0.5$
上送上排	$\tau > 2\tau_n$	$\zeta < 0.5$

表a

空调方式	温度分层效果	工作区风速	速度均匀度	温度均匀度	送风能耗
碰撞射流	好		好	好	较小
置换通风		好	较好	差	小
地板送风	较好		差	一般	一般
分层空调		一般	一般	较好	大

表b



图c

常见气流组织评价

- 贺肖杰对混合通风、置换通风和贴附通风的气流组织性能做了比较，在热舒适指标方面，混合通风适用于具有较大室内负荷的情况，置换通风在小负荷时表现更好，贴附通风适用范围更广，不同负荷下室内热环境良好。在空气品质方面，置换通风和贴附送风的通风效率均大于1，空气品质较好，而混合通风效率小于1。冬季送热风时，置换通风送风快速上浮，贴附送风可以将热风送至工作区。
- 清华大学的李先庭老师提出综合各种高大空间气流组织现有评价指标的评价体系，结合不同权重给出百分制的评分，从而确定适合的气流组织形式。其中，节能项体现能量利用系数的大小，即空调分层效果带来的建筑节能，并未涉及末端输送能耗。

在不同需求下设置不同的权重

序号	目标	比赛区满意度	观众席满意度	有效能耗	修正换气效率
权重1	保证比赛区要求	0.5	0.3	0.1	0.1
权重2	满足观众舒适性	0.3	0.5	0.1	0.1
权重3	节能	0.2	0.2	0.5	0.1
权重4	保证空气新鲜度	0.3	0.2	0.1	0.4

不同权重下三种形式的得分

权重序号	权重1	权重2	权重3	权重4
送风形式	保证比赛区要求	保证观众舒适性	节能	保证空气新鲜度
下送风形式	89.5	89.3	92.3	89
上送风形式1	77	82.1	80	77
上送风形式2	93.3	92.2	85	85

- 综上所述，现有的常见气流组织评价指标涉及热舒适性、空气品质和建筑节能，没有空调通风末端输送能耗与上述指标的综合评价。不考虑末端输送能耗的情况下，喷口送风和地板/座椅送风的分层空调设计看起来很好，一旦考虑末端能耗的影响，其评价结果也未必优良。

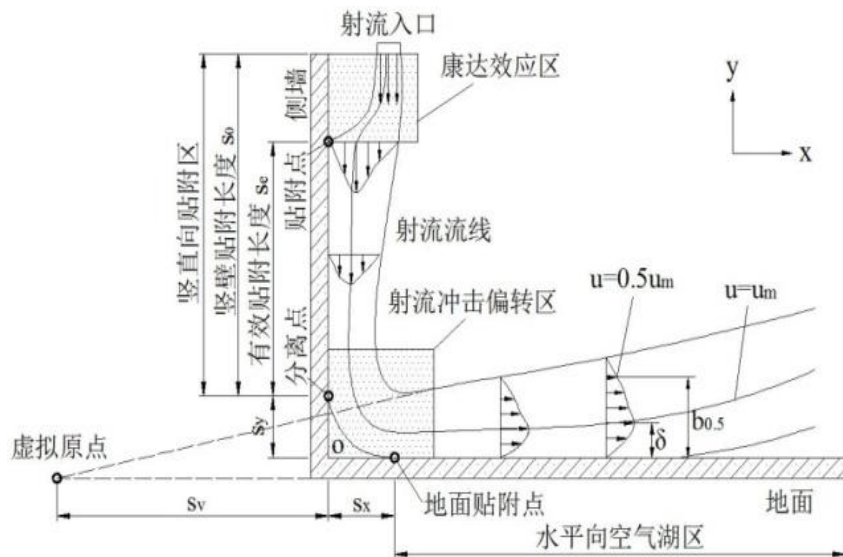


02

竖壁贴附射流设计实例及其节能效果

竖壁贴附射流原理

- 竖壁贴附射流属于半受限射流，一般形式是送风口布置在房间上部靠近竖壁的区域，送风由于康达效应与竖壁形成贴附现象，撞击地面后转为水平向扩散流动，在工作区形成类似于置换通风的空气湖，具有较高的空气品质和通风效率。其节能性主要体现在以下两点：一是在房间高度方向具有温度分层，送风只保证人员区舒适度，上部区域温度不控制，送风提供冷量大大小于全室空调冷负荷；二是由于康达效应的“扶持”，送风风速衰减缓慢，热质交换均匀，送风阻力小于混合通风，进而风机压头较小耗电少。

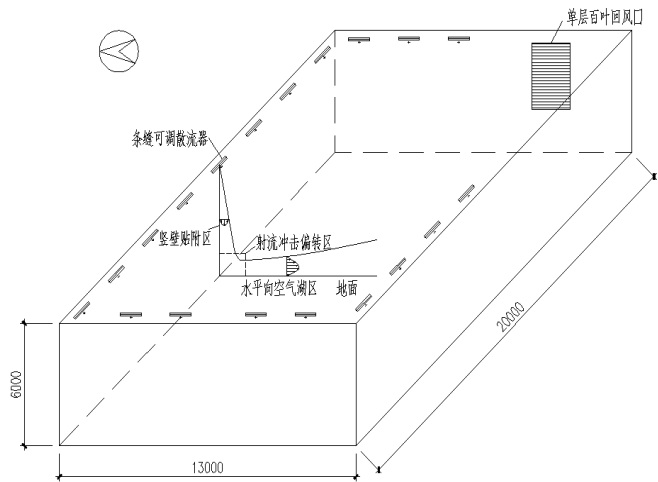


- 送风口一般为条形风口，出口风速较低，湍流强度较小，沿程掺混周围空气较少，具有明显的温度分层现象，有利于减少负担的建筑负荷。
- 出风风速低，出口压损小。送风口在上部，没有直接进入人员区，送风温差较置换通风大，送风量较小，空调末端能耗低。



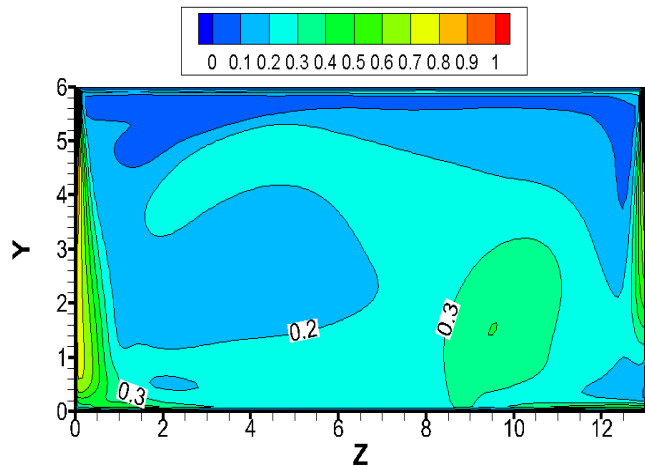
贴附射流设计实例

- 设计概况和要求：该房间为重要会议室，人员分布在居中的椭圆形会议桌。人员区舒适度应满足规范要求，空气品质高，送风不能吹头。空调结合精装修设计采用条缝风口竖壁贴附射流气流组织，送、回风口布置和单风口竖壁贴附射流示意图见下图。
- 西安建筑科技大学的李安桂老师等对竖壁面贴附射流送风气流组织进行了一系列研究并提出了工程化设计方法，然而受限于精装修设计，该会议室的风口布置与文献中设计方法提供的标准型式有较大差距，故提出用CFD技术优化气流组织设计的方法进行末端的选型计算。本工程建立简化会议室模型，几何尺寸为 $20 \times 13 \times 6$ (m)；室内设计温度 25°C ，相对湿度60%；热源边界条件设置如下：天花板 $20\text{W}/\text{m}^2$ ；西、北外墙 $33.08\text{W}/\text{m}^2$ ；地面 $38.65\text{W}/\text{m}^2$ （人员负荷），其余墙面为绝热墙面。

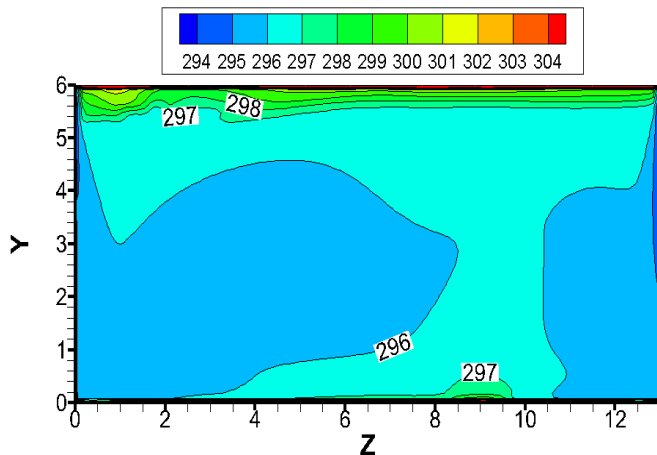


贴附射流设计实例

- 按全室空调模式计算室内热、湿负荷，确定露点送风温度 17°C ；然后按全室空调负荷计算总送风量为 $10000\text{m}^3/\text{h}$ ，可布置19个条缝风口，每个尺寸为 $1.0\times 0.075(\text{m})$ ，射流出口速度为 2m/s ；在侧墙上部设置单层百叶回风口，为不影响贴附射流效果回风风速应小于 1m/s 。此工况（工况一）的CFD温度和速度分布见下图。
- 由图可见，消除全室空调负荷的送风气流温度场竖向分层不明显，这是由于速度过大流场相互撞击混合所致；工作区温度低于热舒适要求，速度场较均匀且满足要求。



工况一纵截面速度分布图

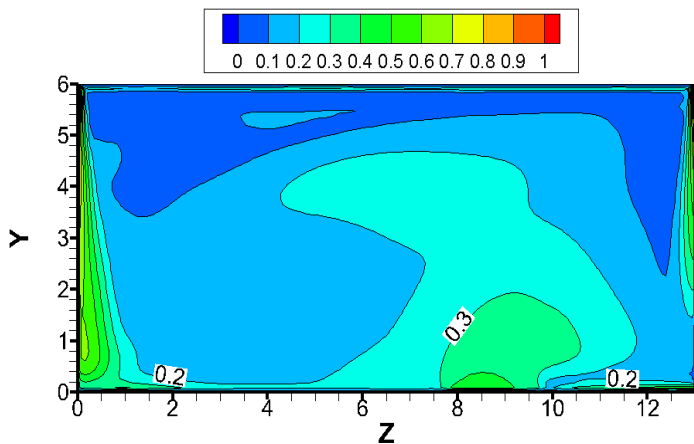


工况一纵截面温度分布图

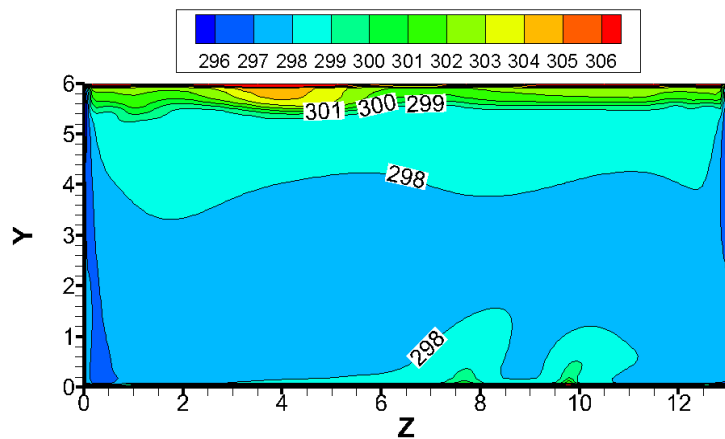


贴附射流设计实例

- 为提高工作区温度且增大竖向温度梯度以利于节能，在不改变送、回风口的条件下，将送风速度设为工况二1.5 m/s进行上述模拟。其CFD温度和速度分布见下图。
- 由图可见，工况二能够有效去除室内余热，并形成很好的温度分层，具有较高的通风效率；工作区温度场和速度场均满足热舒适要求。由于竖壁贴附送风掺混作用弱，送风撞击地面偏转后具有置换通风的效果，空气品质较好。



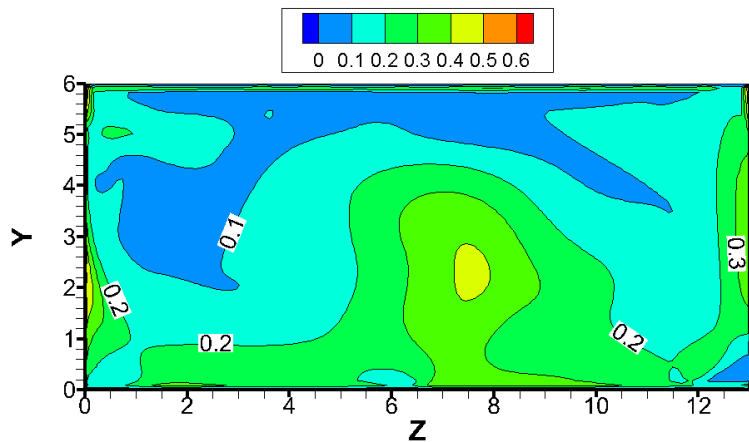
工况二纵截面速度分布图



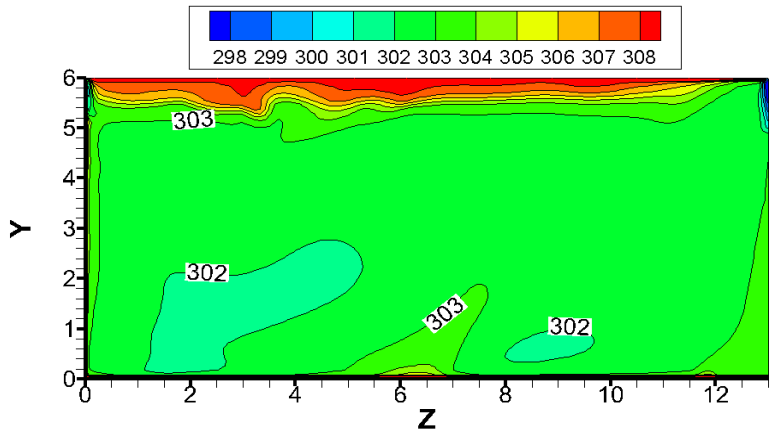
工况二纵截面温度分布图

贴附射流设计实例及节能量

- 工况三进一步减小送风风速至1 m/s，其CFD温度和速度分布见下图。可见，贴附射流已不能到达工作区，室内余热无法有效去除。
- 该会议室采用射流风速1.5 m/s的条缝竖壁贴附射流气流组织，相对于混合通风的气流组织，减少末端机组的供冷量约16%，同时总送风量降至7500 m³/h，末端风机能耗降低约24%。



工况三纵截面速度分布图



工况三纵截面温度分布图

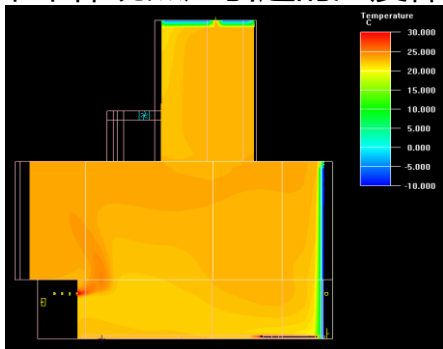


03

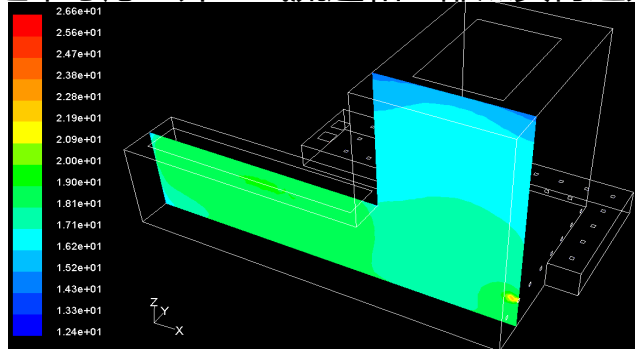
冬季气流组织问题及解决路径

高大空间冬季空调气流组织问题

- 内区高大空间冬季送冷风，气流组织同夏季。
- 有热负荷需求的高大空间，冬季送热风由于热压作用，送风快速上浮，不能有效到达人员区，人员区的热舒适和空气品质均差。室内温度场基本呈现下冷上热的温度梯度，射程距离远的送风方式尤其突出。导致按全室空调计算得出的热负荷不足，需增大供热量。此为设计量足而效果不好的原因。
- 分层空调冬季不节能，冬季送风量一般与夏季计算风量相同，相对全室空调送风量小，从而送风温度更高，其热压作用越强，竖向温度梯度越大，能量利用系数低。
- 座椅/地送风的置换通风送风直接进入人员区，送风温差小，送风量较大，末端能耗大。且平面上温度分布不均，风口周围温度高于其他区域。
- 有的模拟结果未体现热压引起的温度梯度，原因是未考虑室外空气流通和上部热负荷过大。

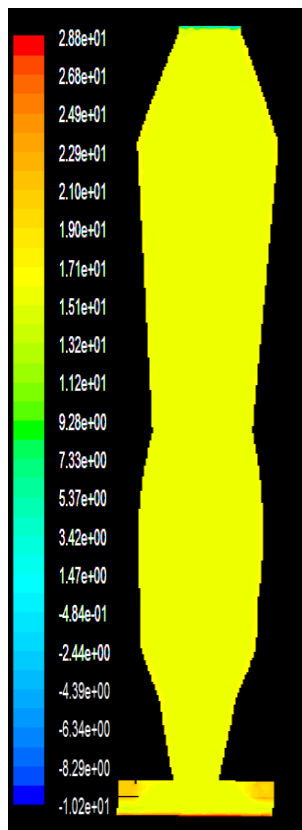


泰安文化艺术中心门厅（中部侧送下部侧回，辅以地暖）



协和医院门诊大厅（中部侧送下部侧回）

高大空间冬季空调气流组织影响因素



北京丽泽SOHO中庭（下部侧送下部侧回辅以地暖）

- 送风温度：冬季送热风的热压作用由送风的温度和周围环境温度决定，温度越高，出风上浮越快，室内温度梯度越大。
- 建筑气密性：下部出入口和顶部构造的气密性也影响了热压作用的强弱，某种意义上是主要因素。下部室外进风加剧了热压作用，顶部出风散失了热量，造成能量浪费。
- 送风温差：送风温差小，送风量大，末端能耗高；送风温差大，热压大，出口湍流强度大，风口出口压损大，末端能耗高。
- 室外温度：室外冷空气渗透或侵入加剧了送风热压效应，冬季送热风的北方地区室内温度梯度大于南方地区。

- 以上措施的综合应用。

三种工况的送风示意



垂直吹出状态

调节射流角度+降低送风温度+地暖



Thanks

郑坤

电话：13910401942

邮箱：zhengk@cadg.cn

地址：北京市西城区车公庄大街19号