

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-146-11

高大中庭室内热环境的优化模拟分析

李晨玉¹ 曾刚¹ 金海魁¹ 谢孟晓² 王健^{1,2}

(1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司 上海 200092;

2. 同济大学 上海 200092)

【摘要】 针对大型公共建筑高大中庭夏季供冷出现的顶部温度过高、底部温度过低现象,结合中庭自身特点提出三种空调送风方案,并利用计算流体力学(CFD)综合考虑温度和风速两种控制目标,优化高大中庭及周边区域室内热环境,满足热舒适的同时利于节能。

【关键词】 高大中庭; 热环境; 空调系统; 气流组织; CFD模拟

中图分类号 TU83 文献标识码 A

Optimization and Simulation Analysis of Thermal Environment in Large Atrium

Li Chenyu¹ Zeng Gang¹ Jin Haikui¹ Xie Mengxiao² Wang Jian^{1,2}

(1. Architecture Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200092;

2. Tongji University, Shanghai, 200092)

【Abstract】 Aimed at the excessive high temperature at top and excessive low temperature at bottom that occurs in high and large atrium of public buildings during cooling in summer, three air supply schemes are proposed, combined with the characteristics of the atrium. Temperature and wind speed are considered synthetically by computational fluid dynamics (cfD). Optimize the indoor thermal environment of the large atrium and surrounding areas to meet the thermal comfort and at the same time to save energy.

【Keywords】 Large Atrium; Thermal Environment; Air-Conditioning System; Air Distribution; CFD Simulation

0 引言

高大中庭作为一种丰富室内空间、改善内区采光和通风的公共空间,被广泛应用于办公、商业、医疗等建筑类型中。高大中庭体量大、空间复杂、大面积采用玻璃幕墙或天窗,造成中庭垂直温度梯度过大、温度和风速难以同时满足控制要求、太阳辐射对热环境的影响较大等问题^[1-3]。

高大中庭功能、形体的特殊性和复杂性使得传统的设计方法很难对上述问题提出有据可依的解决方案,CFD数值模拟法较现场实测、风洞试验等方法具有快速简便、准确有效、成本较低等优点,受到广泛认可并被大量应用的工程实践中^[4,5]。

本文以浙江某具有高大中庭的办公建筑为例,

利用计算流体力学(CFD)方法对中庭室内热环境进行优化模拟分析,结合中庭自身特点,为解决上述问题提出合理建议。

1 项目概况

1.1 中庭概况

某办公建筑位于浙江省杭州市,为丰富室内空间及改善内区采光和通风,2层~12层设置有通至屋面的采光中庭(中庭总高:约39m~73m)。顶部均为采光玻璃(天窗),地面层为人员活动区。中庭通过共享空间与各层办公区连通,中庭与共享空间(或办公区)之间无封闭的物理隔断;3~12层西侧每层设有回廊,5、7、9、11层东侧设有连

作者简介:李晨玉(1990.5-),女,硕士,工程师,E-mail:402529050@qq.com

通讯作者:王健(1958.4-),男,硕士,教授级高工,E-mail:wangjiantjad@tongji.edu.cn

收稿日期:2019-06-06

廊。中庭及周边共享空间平面图详见图 1。

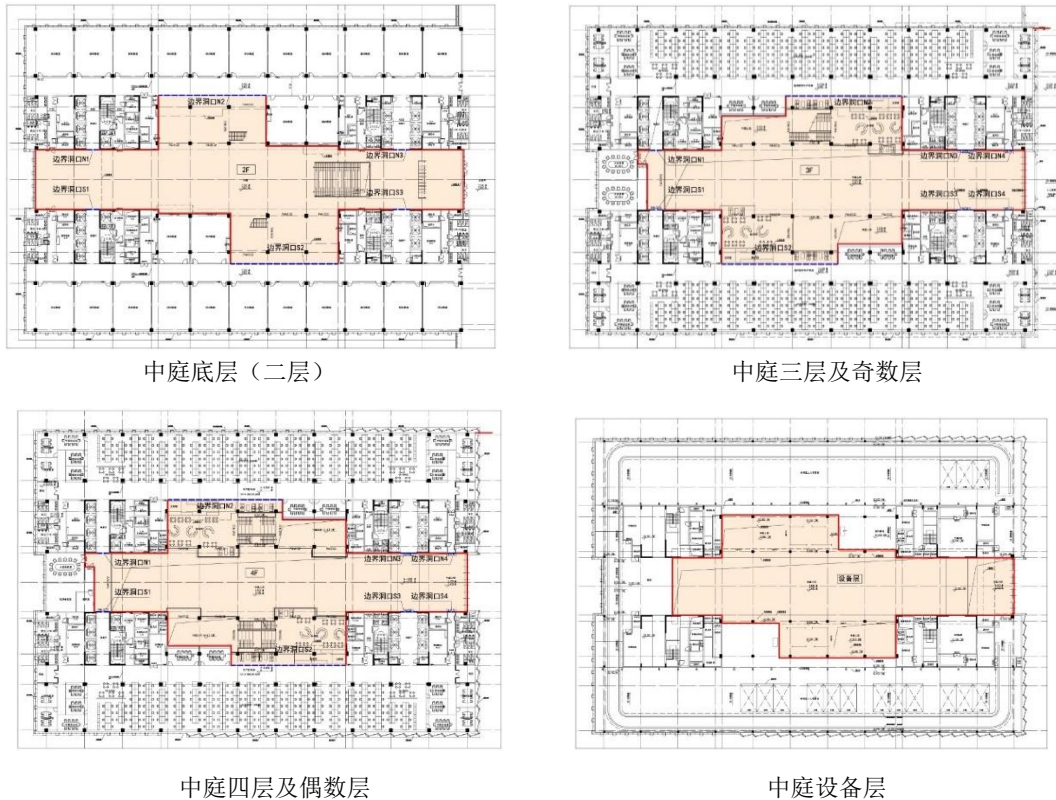


图 1 中庭及周边共享区各层平面图

Fig.1 Floor plan of atrium and surrounding Shared area

1.2 空调系统概况

高大中庭底部和顶部分别设置全空气定风量系统, 西侧幕墙下设置落地式风机盘管; 共享区分层设置全空气变风量系统 (VAV)。2 层地面风机盘管夏季送风温度 16℃, 冬季送风温度 30℃; 2 层

共享区夏季送风温度 15℃, 冬季送风温度 25℃; 3~12 层共享区、回廊及连廊夏季送风温度 15℃, 冬季送风温度 15℃。共享区空调气流组织形式及风口布置详见图 2。



图 2 共享区空调气流组织形式及风口布置

Fig.2 Air distribution and tuyere layout of air conditioner in shared area

2 评价标准

2.1 标准要求

根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB 50736-2012 中“3.0.2 舒适性空调室内设计参数应符合以下规定：

(1) 人员长期逗留区域空调室内设计参数应

符合表 1（规范表 3.0.2）的规定：

(2) 人员短期逗留区域空调供冷工况室内设计参数宜比长期逗留区域提高 1℃~2℃，供热工况宜降低 1℃~2℃。短期逗留区域供冷工况风速不宜大于 0.5m/s，供热工况风速不宜大于 0.3m/s。”^[6]

表 1 人员长期逗留区域空调室内设计参数

Table 1 Indoor design parameters of air conditioning in long-term stay area

类别	热舒适度等级	温度 (°C)	相对湿度 (%)	风速 (m/s)
供热工况	I 级	22~24	≥30	≤0.2
	II 级	18~22	—	≤0.2
供冷工况	I 级	24~26	40~60	≤0.25
	II 级	26~28	≤70%	≤0.3

2.2 设计要求及目标

高大中庭与各层周边共享区、办公区连通，若中庭顶部过热，热气会扩散至周边共享区和办公区，降低热舒适性，故在人员活动区满足设计要求的同时，顶部的温度也必须进行控制。同时，热舒

适度不仅与温度有关，室内空气流动在一定程度上会加快人体的对流散热和蒸发散热，提供冷却效果，但风速过大会导致吹风感强烈，不利于舒适性^[7]。综上，确定高大中庭及周边功能区的室内设计要求及目标，如表 2 所示。

表 2 高大中庭室内温度、风速控制目标

Table 2 Temperature and wind speed requirements in large atrium

空调区域	夏季		冬季	
	温度 (°C)	风速 (m/s)	温度 (°C)	风速 (m/s)
中庭底部及周边区域	≤23	人员长期逗留区域 (2 层楼板、共享区)	≤18	人员长期逗留区域 (2 层楼板、共享区)
中庭顶部及周边区域	≥27	≤0.3m/s; 人员短期逗留区域: ≤0.5m/s	≥24	≤0.2m/s; 人员短期逗留: ≤0.3m/s

3 模拟区域及工况确定

3.1 模型简化策略

因中庭与共享区相连通，难以分割，故模拟区域定义为中庭及其周边共享区。但共享区空调系统方案不变，仅研究中庭空调系统优化对中庭及其周边热环境的影响。

因中庭与周边办公区连通，将中庭模型简化：假设与周边办公区有绝热的物理封闭隔断。

考虑中庭与各层办公区之间的热质交换：将以上物理封闭隔断设为速度边界，保证中庭与周边办公区之间的空气流动和风量平衡，风速按风量平衡

计算确定；周边共享区、办公区的空调系统均开启，且均达到室内设计温度（夏季 25℃、冬季 20℃）。

太阳辐射透过天窗和玻璃幕墙到达人员活动区，考虑太阳辐射对中庭热环境的影响：太阳辐射取《中国建筑热环境分析专用气象数据集》夏季/冬季日平均温度最高/最低那一日太阳辐射量最高那一时刻的太阳辐射量、太阳高度角和方位角^[8]。

3.2 模拟方案与工况

共享区空调系统方案不变，仅研究中庭空调系统优化对中庭及其周边热环境的影响。中庭空调系统方案及模拟工况详见表 3、表 4。

表 3 中庭空调系统方案及模拟工况

Table 3 Air conditioning system scheme and simulation conditions of the atrium

空调方案	工况	室外温度	中庭下部送风系统		中庭上部空调系统			排风系统	备注
			2~3 层送风	2 层回风	8~屋顶层送风	屋顶层集中送风	4~6 层回风	顶层排风	
方案一	1-1	夏季 35.6℃	√	√	×	×	×	√	开启太阳辐射 (供冷最不利工况)
	1-2	冬季-2.4℃	√	√	×	×	×	√	关闭太阳辐射 (供热最不利工况)
	1-3	冬季-2.4℃				同工况 1-2			开启太阳辐射 (供热最有利工况)
方案二	2-1	夏季 35.6℃	√	√	×	√	√	√	开启太阳辐射 (供冷最不利工况)
方案三	3-1	夏季 35.6℃	√	√	√	×	√	√	开启太阳辐射 (供冷最不利工况)

注: 方案二、方案三冬季也均不开启中庭上部空调系统, 故方案二、方案三的冬季工况和方案一的冬季工况完全相同。

表 4 各工况太阳辐射、内热源启闭情况

Table 4 The opening and closing conditions of solar radiation and internal heat source in each working condition

热源 工况	太阳辐射		内热源		
	中庭	回廊及连廊	中庭	回廊及连廊	共享区
夏季 (工况 1-1、工况 2-1、工况 3-1)	√	√	√	√	√
冬季 (工况 1-2)	×	×	√	√	√
冬季 (工况 1-3)	√	√	√	√	√

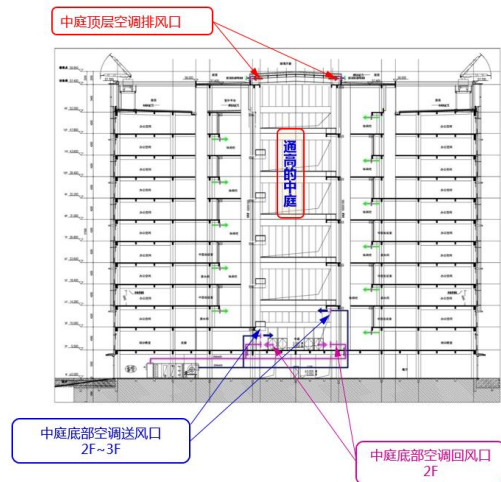
空调方案一: 中庭底层 (人员活动区) 设置空调送风系统 (夏季送风温度 16℃, 冬季送风温度 25℃)。中庭顶部设置排风系统 (平衡大楼空调新风)。中庭上部区域不设置空调送风系统, 考虑通过排风将中庭上部的热量带走。

空调方案二: 中庭底层 (人员活动区) 设置空调送风系统 (夏季送风温度 18℃, 冬季送风温度 25℃)。中庭顶部设置排风系统 (平衡大楼空调新风)。中庭上部区域增加空调送风系统, 夏季送冷风降温 (16℃), 冬季不送风。考虑空调冷风会自然下沉, 中庭上部区域空调系统的送风口集中设置在 12F 和设备层。

空调方案三: 中庭底层 (人员活动区) 设置空调送风系统 (夏季送风温度 18℃, 冬季送风温度 25℃)。中庭顶部设置排风系统 (平衡大楼空调新风)。中庭上部区域增加空调送风系统, 夏季送冷风降温 (16℃), 冬季不送风。中庭上部区域空调

系统的送风口均匀设置在 8F~设备层, 送风量按倒金字塔分配。

中庭三种空调方案示意图如图 3 所示。



(a) 方案一

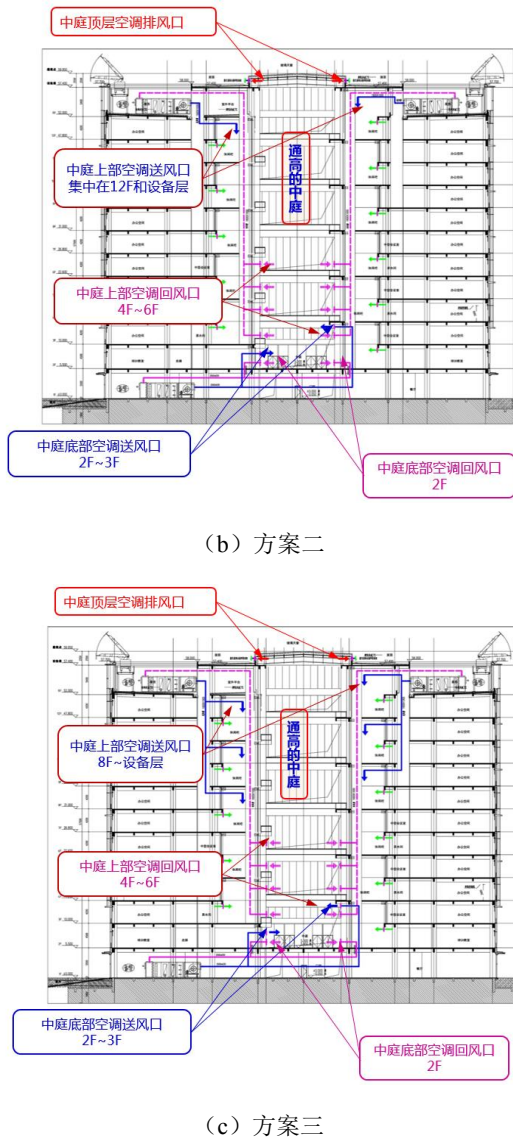


图3 中庭三种空调方案示意图

Fig.3 Schematic diagram of the three air conditioning schemes in the atrium

4 技术路线

4.1 模拟软件

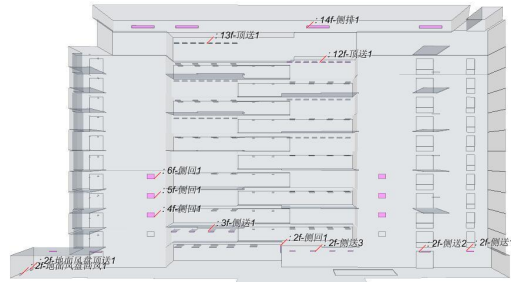
CD-adapco 公司的商用 CFD 软件 STAR-CCM+, 其独特的架构使其具有稳定、超高精度-时间比的特点, 在汽车、航运等不同领域均有广泛使用和认可, 并且在建筑环境领域有越来越多的应用。

4.2 几何模型

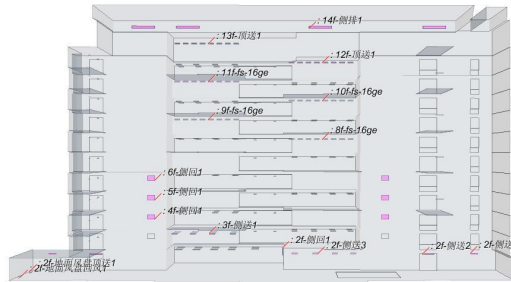
根据建筑、暖通专业图纸建立详细的中庭及周边共享区三种空调系统方案的模型, 如图 4 所示。



(a) 方案一



(b) 方案二



(c) 方案三

图4 中庭及周边共享区三种空调系统方案模型图

Fig.4 Model diagram of three air-conditioning system schemes for atrium and surrounding shared area

4.3 数学模型与边界条件

模拟过程中, 为简化问题, 数学模型与边界条件做出如下假设:

- (1) 中庭内空气不可压缩且符合 Bossinesq 假设;
- (2) 空气流动为稳态湍流;
- (3) 室内空气为辐射透明介质;
- (4) 不考虑漏风影响, 认为室内气密性良好;
- (5) 采用较基础模型改进的 RNG $k-e$ 两方程模型, 速度与压力耦合采用 PISO 算法;
- (6) 求解区域的离散采用控制容积法, 控制体积为多面体;

(7) 送风口设定为速度进口型边界, 回风口设定为速度出口型边界, 对于围护结构壁面及地面速度分量均采用无滑移边界条件, 即壁面速度分量为零。

4.4 参数设置

4.4.1 壁面边界条件

浙江省杭州市冬季空调室外计算干球温度 -2.4℃, 室内设计温度为 20℃; 夏季空调室外计算干球温度 35.6℃, 室内设计温度为 26℃。

表 5 壁面边界条件

Table 5 Wall boundary conditions

季节	夏季	冬季	
屋顶天窗	传热系数 (W/m ² ·K)	2.4	
	环境温度 (°C)	35.6	-2.4
	发射率、透射率	0.11、0.26	0.11、0.26
屋面	传热系数 (W/m ² ·K)	0.48	
	环境温度 (°C)	35.6	-2.4
东、西侧幕墙	传热系数 (W/m ² ·K)	2.4	
	环境温度 (°C)	35.6	-2.4
	发射率、透射率	0.11、0.28	0.11、0.28
太阳辐射	直射辐射 (W/m ²)	794.65	0
	散热辐射 (W/m ²)	149.35	241.67
方位角、高度角	-64.39°、75.45°	-31.03°、32.71°	

中庭围护结构热工参数根据本项目节能计算书确定, 屋面传热系统为 0.22W/m²·K, 幕墙传热系数为 0.24W/m²·K, 屋顶天窗传热系数为 2.40W/m²·K, 太阳辐射参数根据《中国建筑热环境分析专用气象数据集》夏季、冬季日平均温度最高、最低那一日的最高太阳辐射量确定^[8]。壁面边界条件详见表 5。

4.4.2 室内负荷

根据暖通设计, 中庭及其周边共享区的室内负荷主要为照明、设备、人员散热, 室内各项负荷及总负荷详见表 6。

表 6 室内各项负荷及总负荷

Table 6 Indoor load and total load

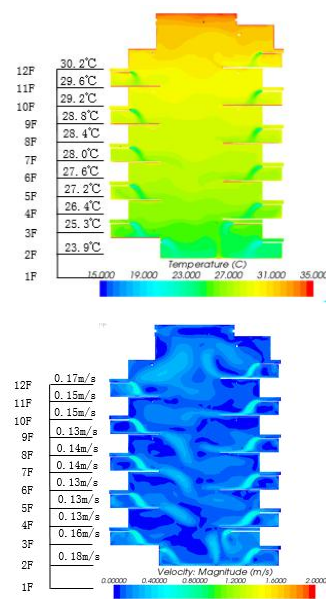
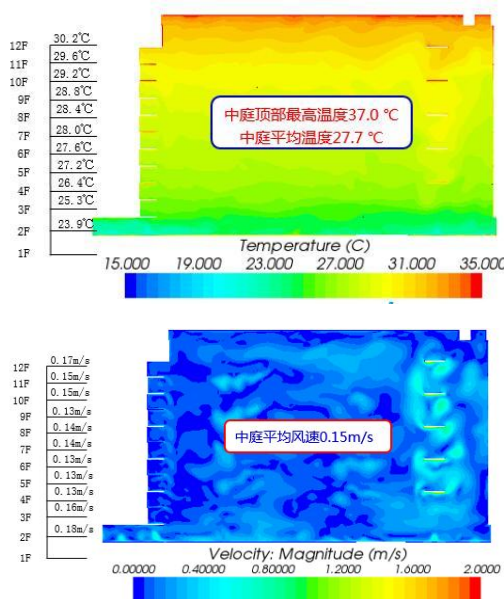
区域	单位照明负荷 (W/m ²)	单位设备负荷 (W/m ²)	单位人员负荷 (W/m ²)	人员密度 (W/m ²)	单位面积室内负荷 (W/m ²)
中庭	10	5	31	0.17	46
回廊及连廊	10	5	18	0.10	33
共享区	10	15	45	0.25	70

注: 将室内负荷发热量设置在中庭地面和各层共享区、回廊及连廊地面上。

5 模拟结果与分析

5.1 空调方案一

5.1.1 工况 1-1



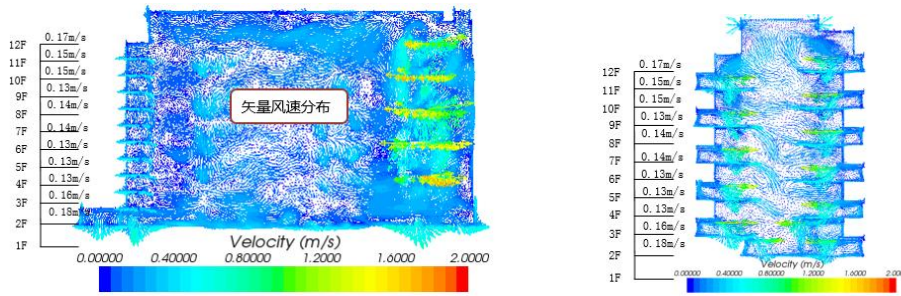


图5 工况 1-1 中庭横、纵剖面温度、风速、矢量风速分布

Fig.5 Condition 1-1: The temperature, air speed and vector wind speed of the atrium in the different direction

工况 1-1 温度分布：5F 以上中庭平均温度 >27℃，共享区温度高达 29.0℃ 以上，不满足夏季 >27℃ 的控制目标，11~12F 的共享区温度偏高，人员舒适感很差。其中连廊及回廊 3F~7F 温度基本满足要求，7F 以上温度不满足夏季 >

27℃ 的控制目标，11F 温度达到 30℃ 左右。

工况 1-1 风速分布：3F~12F 平均风速均接近 0.20m/s 的控制目标；风速最大的 2F 超过控制目标 0.25m/s。

5.1.2 工况 1-2

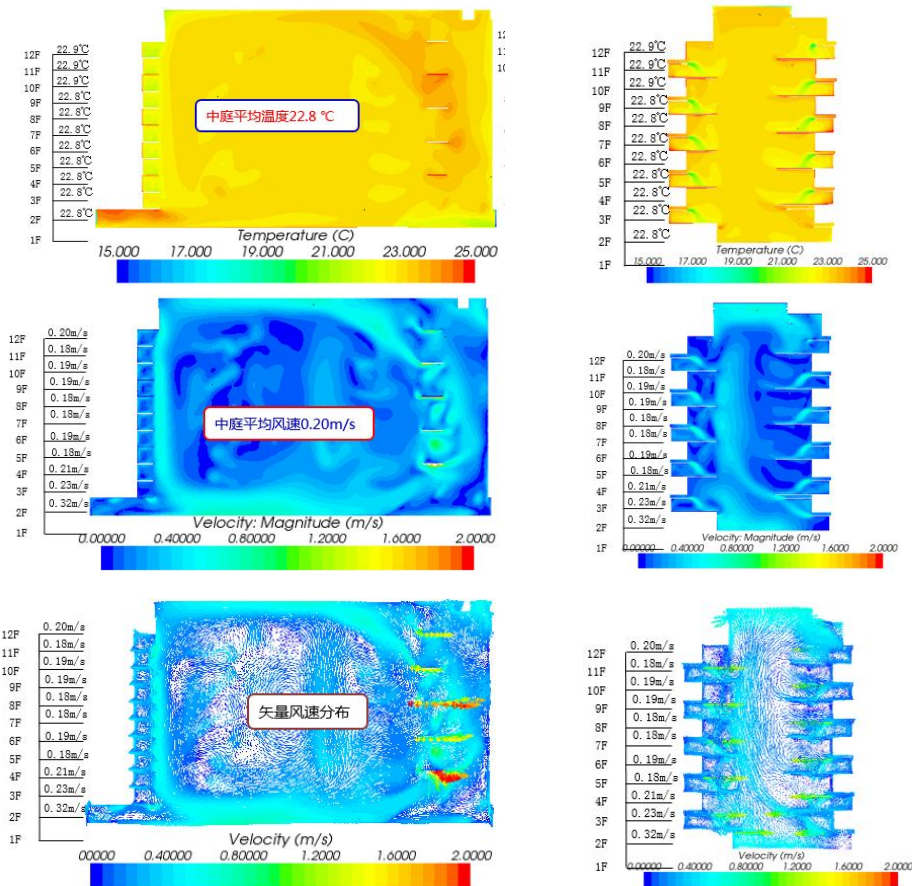


图6 工况 1-2 中庭横、纵剖面温度、风速、矢量风速分布

Fig.6 Condition 1-2: The temperature, air speed and vector wind speed of the atrium in the different direction

工况 1-2 温度分布：中庭底部区域温度 <18℃，中庭上部周边共享区温度 >24℃，满足控制目标要求；各层温度均在 22.8℃ 左右，人员舒

适感好。其中连廊及回廊 3F~12F 温度满足要求，11~12F 的回廊和连廊温度 22.8℃ 左右，满足冬季 >24℃ 的控制目标，人员舒适感较好。

工况 1-2 风速分布: 中庭 3F~12F 平均风速均接近 0.20m/s 的控制目标; 风速最大的 2F 超过控制目标 0.12m/s。其中连廊 3F~12 平均风速均

满足要求, 11F 连廊最高风速为 0.15m/s。
5.1.3 工况 1-3

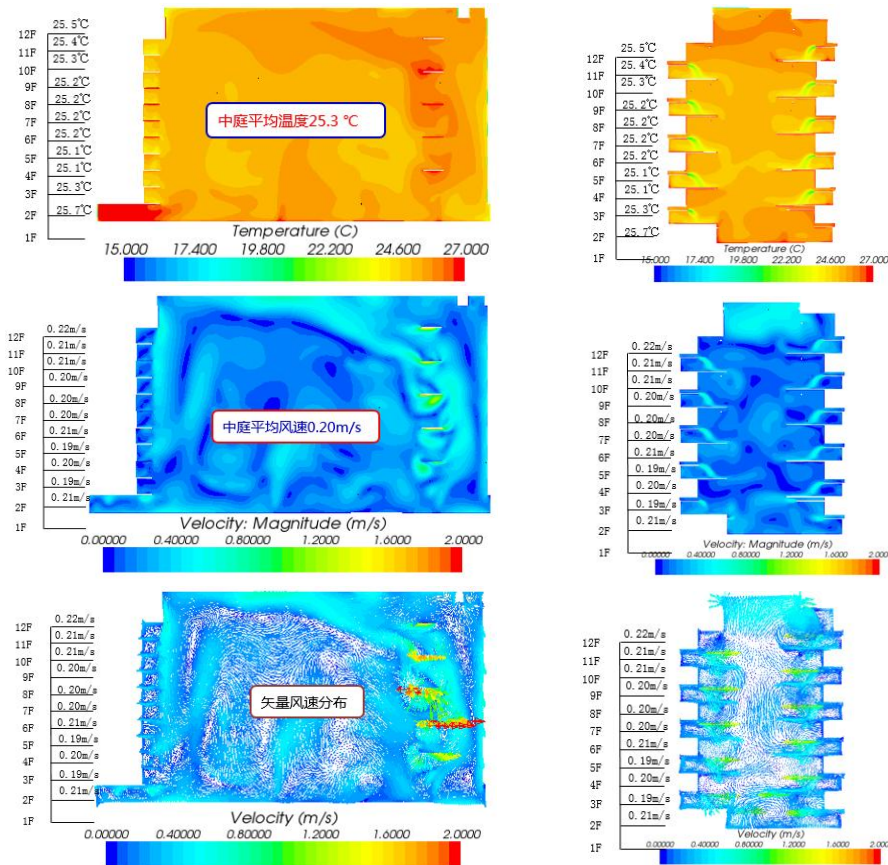


图 7 工况 1-3 中庭横、纵剖面温度、风速、矢量风速分布

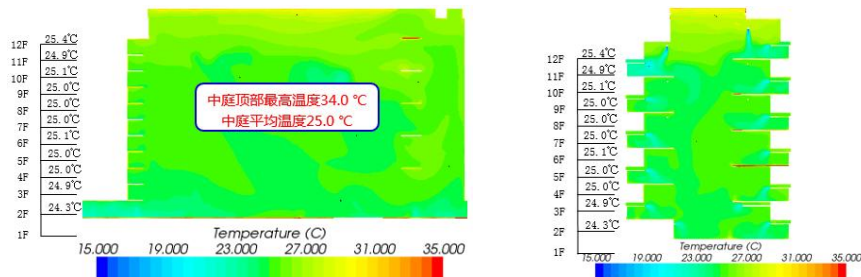
Fig.7 Condition 1-3:The temperature , air speed and vector wind speed of the atrium in the different direction

工况 1-3 温度分布: 中庭上部周边共享区温度>24℃, 不满足控制目标要求; 各层温度均在 25.0℃以上, 人员体感偏热。其中连廊及回廊 3F~12F 温度整体较高, 维持在 24℃以上, 不满足要求; 11F 连廊温度 26℃左右。

接近 0.20m/s 的控制目标; 风速最大的 12F 超过控制目标仅 0.02m/s。其中连廊及回廊 3F~7F 平均风速基本满足要求, 9F 和 11F 部分区域最高风速为 0.31m/s, 不满足要求。

工况 1-3 风速分布: 中庭 2F~12F 平均风速均

5.2 空调方案二



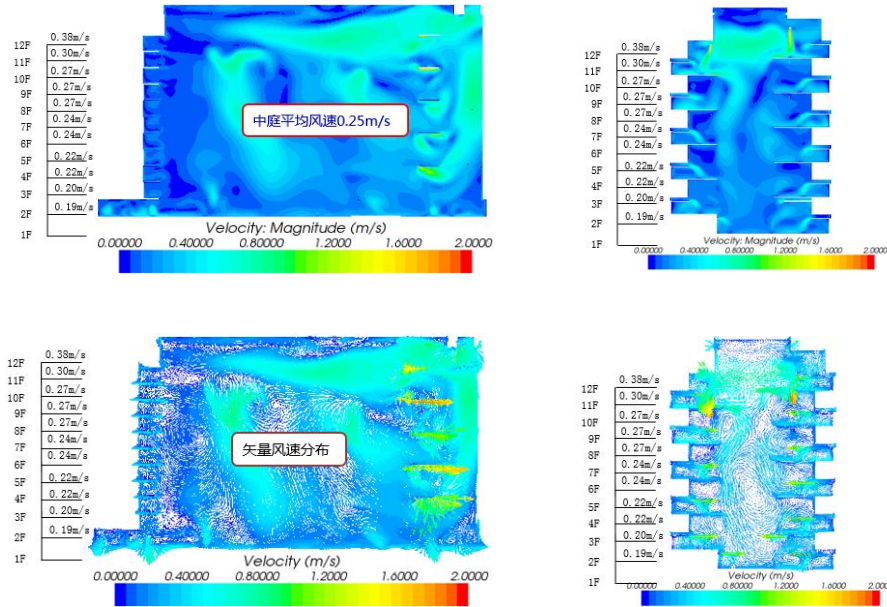


图 8 工况 2-1 中庭横、纵剖面温度、风速、矢量风速分布

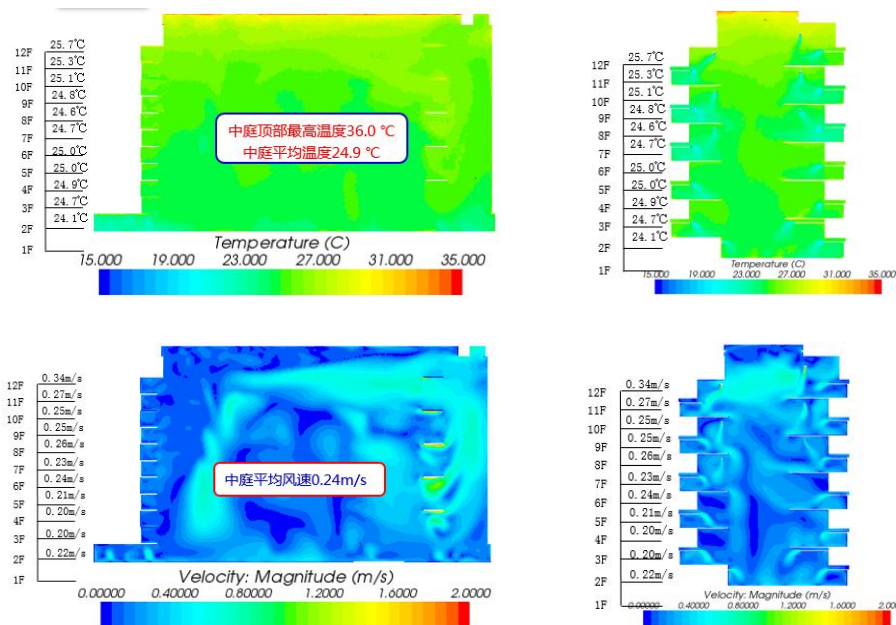
Fig.8 Condition 2-1:The temperature , air speed and vector wind speed of the atrium in the different direction

工况 2-1 温度分布:中庭底部区域温度 $\leq 23^{\circ}\text{C}$,中庭上部周边共享区温度 $\geq 27^{\circ}\text{C}$,满足控制目标要求;但 11-12F 共享区存在明显的局部温度过低,仅 22°C 左右,人员体感偏冷。其中连廊及回廊 3F~12F 温度均满足要求小于 26°C ,11~12F 的回廊和连廊温度均小于 26°C ,满足夏季 $\geq 27^{\circ}\text{C}$ 的控制目

标,人员舒适感较好。

工况 2-1 风速分布:中庭 2F~11F 平均风速均满足 $\leq 0.30\text{m/s}$ 的控制目标;仅 12F 超过控制目标 0.08m/s 。其中连廊及回廊 3F~12F 平均风速满足要求,7F 风速最大为 0.27m/s ,也满足要求。

5.3 空调方案三



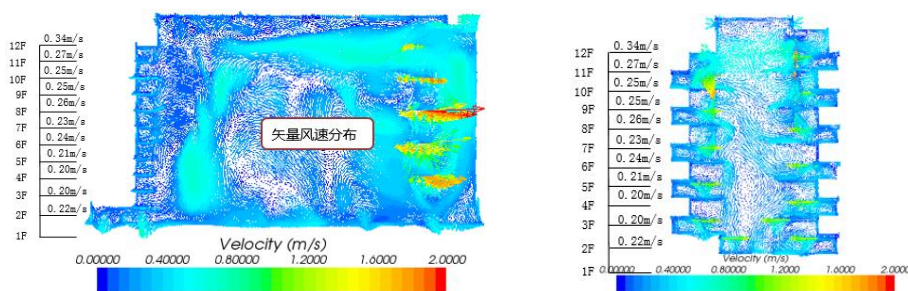


图 9 工况 3-1 中庭横、纵剖面温度、风速、矢量风速分布

Fig.9 Condition 3-1: The temperature, air speed and vector wind speed of the atrium in the different direction

工况 3-1 温度分布: 中庭底部区域温度 $< 23^{\circ}\text{C}$, 中庭上部周边共享区温度 $> 27^{\circ}\text{C}$, 满足控制目标要求; 且 11-12F 共享区温度较为均匀, 不存在明显的局部温度过低。其中连廊及回廊 3F~12F 温度均满足要求不大于 27°C , 11~12F 的回廊和连廊温度均小于 26°C , 满足夏季 $> 27^{\circ}\text{C}$ 的控制目标, 人员舒适感较好。

工况 3-1 风速分布: 中庭 2F~11F 平均风速均满足 $\leq 0.30\text{m/s}$ 的控制目标; 仅 12F 超过控制目标 0.04m/s 。其中连廊及回廊 3F~12F 平均风速基本满足要求, 5F 连廊局部区域风速最大为 0.37m/s , 不满足要求。

5.4 小结

各工况模拟结果详见表 7。

表 7 各工况模拟结果汇总

Table 7 The simulation results of each working condition

空调区域	空调方案	工况	温度 ($^{\circ}\text{C}$)		风速 (m/s)	
			模拟值	控制值	模拟值	控制值
中庭	方案一	1-1 (夏)	23.9~30.2 (顶层温度偏高)	中庭底部及 周边区域 < 23 ; 中庭顶部及 周边区域 > 27	0.13~0.18	人员逗留区域 (2 层楼板、休闲吧) $\leq 0.3\text{m/s}$; 人员无法到达区域: $\leq 0.5\text{m/s}$
		1-2 (冬)	22.8~22.9	中庭底部及 周边区域 < 18 ;	0.18~0.32 (仅 2F 楼板不满足要求)	人员逗留区域 (2 层楼板、休闲吧) $\leq 0.2\text{m/s}$; 人员无法到达区域: $\leq 0.3\text{m/s}$
		1-3 (冬)	25.1~25.7 (温度整体偏高)	中庭顶部及 周边区域 > 24	0.19~0.22	
	方案二	2-1 (夏)	24.3~25.4	中庭底部及 周边区域 < 23 ;	0.19~0.38 (仅 12F > 0.30)	人员逗留区域 (2 层楼板、休闲吧) $\leq 0.3\text{m/s}$; 人员无法到达区域: $\leq 0.5\text{m/s}$
	方案三	3-1 (夏)	24.1~25.7	中庭顶部及 周边区域 > 27	0.20~0.34 (仅 12F > 0.30)	

对于夏季工况:

(1) 方案一: 5F 以上中庭平均温度 $\geq 27.2^{\circ}\text{C}$, 11~12F 的共享区温度高达 29.0°C 以上, 不满足控制目标, 人员舒适感很差。故方案一基本排除, 不再参与后续比选。

(2) 方案二、方案三比较:

方案二、方案三均能满足控制目标要求, 且两

个方案 3F~10F 的共享区的温度均在 $24.6^{\circ}\text{C} \sim 25.1^{\circ}\text{C}$ 区间; 故对于 3F~10F 共享区的舒适度, 方案三和方案二相当;

方案二的 11-12F 共享区存在明显的局部温度过低, 而方案三 11-12F 共享区不存在明显的局部温度过低; 故对于 11-12F 共享区的舒适度, 方案三优于方案二;

方案二的12F平均风速为0.38m/s,高于方案三12F的平均风速0.34m/s,对于风速控制,方案三优于方案二;

方案二无法实现3F~10F的共享区、11~12F的回廊和连廊、11-12F共享区均达到较好舒适性。

方案二的中庭顶部温度为34.0℃低于方案三中庭的顶部温度36.0℃,方案二通过排风带走的热量小于方案三,空调方案二的节能性不如方案三。

(3) 空调方案三优于方案二,更优于方案一;采用空调方案三可有效改善夏季中庭的温度分层,避免中庭上部温度过高及局部共享区过冷,可实现3F~10F的共享区、11~12F的回廊和连廊、11-12F共享区均达到较好舒适性。

对于冬季工况:

冬季中庭内温度分布受不同空调方案影响较小,垂直方向温度均较为均匀。考虑太阳辐射影响时,中庭整体温升在2.5℃左右。

6 结论

利用数值模拟的方法,研究分析了三种空调送风方案在某高大中庭建筑中气流组织效果,为高大中庭建筑中的送风、回风和排风方案的设计与运行提供了参考,并得到以下主要结论。

夏季、冬季考虑太阳辐射影响时,中庭整体温升均在2.5℃左右;夏季中庭垂直温度梯度受太阳辐射影响更大,考虑太阳辐射时梯度显著加强;冬季受太阳辐射影响较小,太阳辐射考虑与否中庭垂直方向温度均较为均匀。

当高大中庭仅下部送风+顶部排风时,夏季中庭垂直温度梯度过大,仅底部楼层温度满足控制要求,以上各层温度均过高,人员舒适性很差;当高大中庭下部送风+顶层集中送风+顶部排风时,明显改善夏季中庭垂直温度梯度过大问题,温度分布趋于均匀,但集中送风造成底层和顶层局部区域温度过低、风速过大,不利于人员舒适性;当高大中庭下部送风+上部每层均匀送风+顶部排风时,明显改

善夏季中庭垂直温度梯度过大问题,温度分布趋于均匀,同时能保证温度、风速均处于控制范围内,利于人员舒适性,且顶部温度明显降低,通过排风带走的热量多,更利于节能。

按规范和经验设置的空调系统送风量、送风风速,造成夏季室内温度偏低、风速偏高,冬季室内温度、风速均偏高。需考虑项目实际情况、使用需求,尽量均匀布置送风口、降低送风量、送风风速 $\leq 2.0\text{m/s}$ (除喷口),满足热舒适的同时利于节能。

本文所研究的高大中庭建筑还未建设投入使用,不具备现场测试的条件,无法根据测试结果来验证CFD模拟结果的准确性。虽存在一定的缺点和不足,但本文的研究思路与成果能为CFD模拟法预测高大中庭内气流组织理论起到一定推动作用,并为设计人员做空调系统设计时提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 蒋友娣.基于个性化需求的高大中庭热舒适性优化工程实践[J].暖通空调,2013,43(11):32-35.
- [2] 张京奉.公共建筑高大中庭供暖顶部过热底部过冷对策[J].煤气与电力,2008,28(8):27-28.
- [3] 王颖,武海滨,李小明.中庭建筑热环境数值模拟研究[J].制冷空调与电力机械,2010,31(135):41-46.
- [4] 杨晓坤.广州地区玻璃采光顶建筑热环境优化研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [5] 孙燕.高大中庭空调气流组织的数值模拟研究[D].山东:山东建筑大学,2013.
- [6] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [7] 葛昕.某博物馆中庭及相邻区域热环境数值模拟[J].暖通空调,2015,45(6):70-75.
- [8] 中国气象局气象信息中心气象资料室,清华大学建筑技术科学系.中国建筑热环境分析专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.