

上海中心大厦中庭建筑环境数值模拟研究

The Numerical Simulation of the Atrium Environment in Shanghai Center

王颖 武海滨

同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司技术研究中心

摘要: 上海中心大厦中庭高 69.9 米,为外包型中庭,其内外围护结构均为全玻璃幕墙系统,太阳辐射对中庭的热环境影响非常大。本文将能耗模拟软件 IES<VE>和 CFD 软件 Star-CCM+相结合,提出将对流和辐射解耦的一种适用于工程的中庭类建筑模拟方法。利用该方法对中庭夏季几种工况进行了模拟研究,提出了夏季控制中庭上部过热的气流组织方法,为工程师提供设计参考。同时,对中庭内火灾的扩散进行了模拟,对补风口及排风口的位置提出建议。

关键词: 中庭、数值模拟(CFD)、Star-CCM+、IES<VE>、热环境、火灾

Abstract The atrium in Shanghai Center is an “envelope” type—encircling the whole building with the height of 69.9m. The inner and outer façades are all glass curtain walls, so most of the solar radiation can enter the room through these transparent walls. In order to simplify the simulation process, we combine the thermal simulation software IES <VE> and the CFD software Star-CCM+, by which the conduction, the convection and the radiation involved in the heat transfer process can be decoupled with an acceptable precision for real applications. With this method, the thermal environment in the atrium in summer has been carried out, which leads to some suggestions for preventing the over-heat in the upper atrium. Meanwhile, the simulation of fire has been also performed, which gives some suggestions on the arrangement of air suppliers and exhausters.

Key words: atrium、numerical simulation(CFD)、Star-CCM+、IES<VE>、Thermal Environment、Fire

1 引言

中庭类建筑室内热环境问题一直是国内和国际设计师所关注研究的重点,受到“烟囱效应”和“温室效应”的双重作用,有大面积玻璃幕墙或透明屋顶的中庭室内热环境主要存在两方面的问题:一是夏季中庭上部温度很容易过高,从而影响与中庭相邻房间的热舒适性;二是当中庭发生火灾时,在热压作用下,火灾会快速猛烈地向上蔓延。中庭的特殊性使得传统的设计方法很难对此类问题提出有根据的解决方案,因此越来越多的中庭实际问题需要借助数值模拟的方法来解决。因此本文首先提出适合于工程计算需要的联合模拟方法,然后以上海中心为研究对象,分别模拟分析了其夏季

三种气流组织工况和火灾扩散过程，在如何利用中庭自身的特点，合理进行气流组织设计以及防火排烟等方面给出了建议。

2 模拟方法介绍

围护结构为玻璃幕墙系统的高大中庭，其室内热环境受太阳辐射的影响非常严重，尤其在上海这样的中纬度地区则更为明显，中庭内非等温的室内气流受到浮升力和高大空间的双重作用，变得非常复杂，室内流场和辐射场相互影响共同作用，形成了非常复杂的室内热环境，因此数值模拟需要将对流、辐射和导热进行耦合计算分析，目前已有文献可查到这种方法的成功应用个例[1]，但是该方法非常复杂，需要多次相互迭代才可以完成，无论是时间上还是操作上，都无法将该方法推广应用到工程实践中。本文采用能耗模拟软件 IES<VE>和数值模拟软件 Star-CCM+联合模拟的方法，将对流、辐射、导热模拟解耦，模拟方法简单、易于掌握，耗时短，能够满足工程中越来越多的中庭类建筑数值模拟的需要。

如图 1 所示，联合模拟主要分为三步，首先准备输入参数：全年室外气象参数、围护结构参数、室内负荷、空调送风参数等；第二步是 IES <VE>能耗模拟软件的计算过程，通过建立模型，输入计算参数，软件通过墙体表面热平衡和房间热平衡得出建筑内表面温度以及空调负荷；最后是数值模拟软件 Star-CCM+的计算过程，先建立物理模型，再将第二步所得的结果作为边界条件，选取合适的方程进行求解，得出室内温度、速度场分布。由于第二步采用集总参数法计算得出的对流换热量，其与第三部中的对流换热量肯定有误差，因此将第三部得出的对流换热量返回输入到第二部，通过调整围护结构热阻，来得出新的内表面温度分布，这是一个迭代的过程，理论上应该在第三步和第二步的对流换热量完全相等后，结束迭代，但本课题的方法旨在解决工程需求问题，因此在允许的误差范围内，迭代两次就基本可以达到工程上精度要求（温差 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ）。

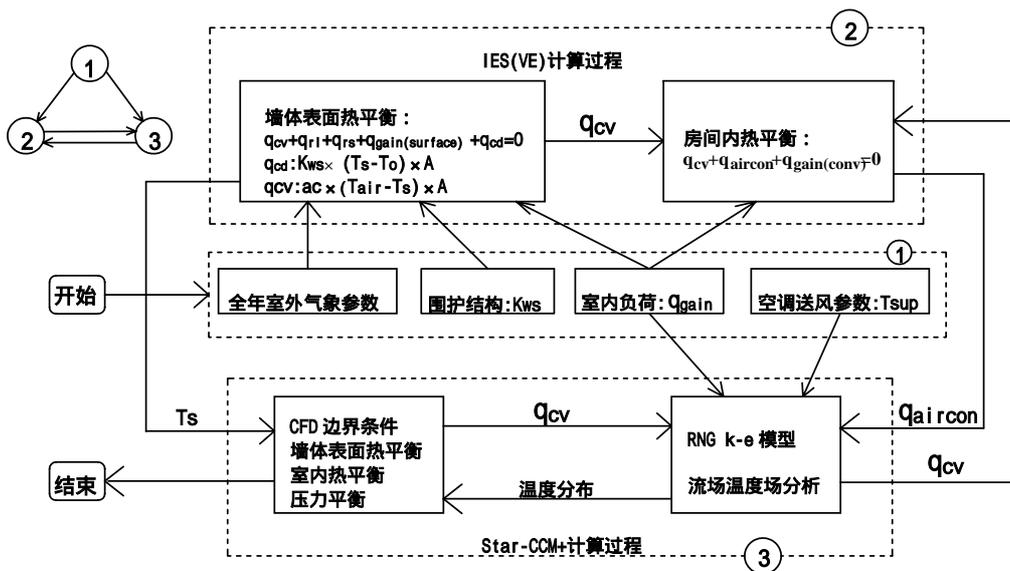


图 1 联合模拟结构图

T_{air} : 空调设计室内空气温度 ($^{\circ}C$) T_s : 墙体表面温度 ($^{\circ}C$) T_{sup} : 空调送风温度 ($^{\circ}C$)
 q_{cv} : 对流换热量 (W) q_{rl} : 长波辐射换热量 (W) q_{rs} : 短波辐射换热量 (W)
 q_{gain} : 室内负荷 (W) $q_{gain(sur)}$: 作用到墙体表面的室内负荷 (W)
 q_{cd} : 热传导量 (W) q_{aircon} : 空调输入的热量或者冷量 (W)
 a_c : 对流换热系数 ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$) K_{ws} : 墙体传热系数 ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$)

3 模型的建立

3.1 上海中心大厦中庭简介

上海中心大厦位于上海浦东新区，结构高度约 632 米。大厦分为 10 段，每段中庭的高度为 69.9 米。中庭内外围护结构均为玻璃幕墙系统，图 3 为其平面布置图，图 4 为立面效果图。从图中看到中庭和办公等功能房间相邻，其空间的热环境和垂直温度分布，会对与其相邻的办公室的空调负荷及舒适度产生较大的影响。

3.2 能耗模拟

IES <VE>根据建筑图纸建立的模型见图 5。底层和顶层为设备层。中庭外立面为全玻璃幕墙系统，和办公空间相邻的内围护面也为全玻璃系统。方案设计阶段内外玻璃参数为：传热系数 $5.8W/m^2 \cdot k$ ，遮阳系数 0.5。随着设计的逐步深入和建筑节能规范的要求，玻璃的性能参数可能会逐步提高，但是本课题仅以此最不利状况参数为基础计算。最终以 7 月 21 日中午 12:30，考虑以空调时间的不利阶段来计算。

由于中庭的底层为人活动区域 (occupied space)，这部分为空调控制区域，而上面的区域 (void space) 为非空调区域，因此在能耗模拟建立模型时将每层分开来建，然后将其之间的楼板去掉，这

样可以分别控制中庭空调区域和非空调区域的室内温度，以此来计算整个中庭的空调负荷;另一方面虽然每层是分别建立的，但是它们是相通的，因此非空调区对空调区负荷的影响在此阶段就首先考虑了进去。

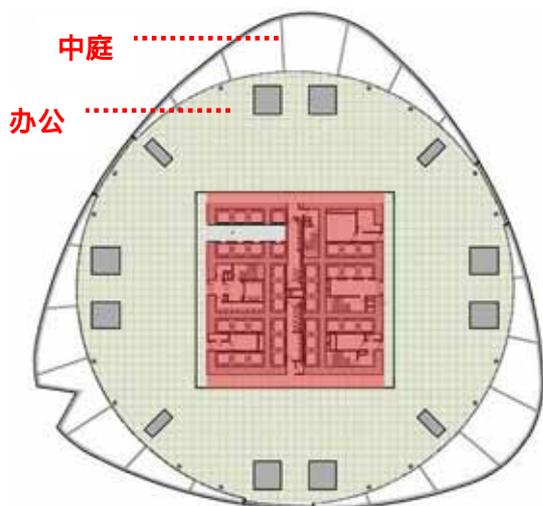


图 3 上海中心大厦平面布置图



图 4 上海中心大厦中庭效果图

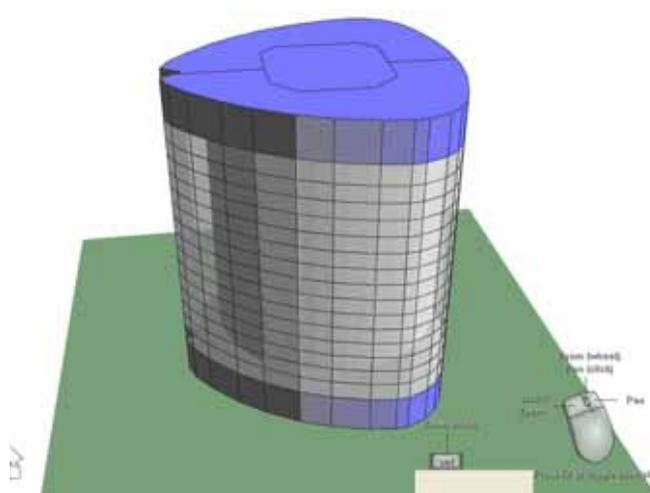


图 5 IES <VE>模型图

3.3 数值模拟

3.3.1 物理模型

由上节中的平面布置图，我们可以看出上海中心大厦中庭由三个形体基本相同但是朝向不同的三个中庭组成，本文在进行数值模拟计算的过程中，只取夏季最不利的一面的中庭来进行模拟。数值模拟物理模型如图 6 所示。

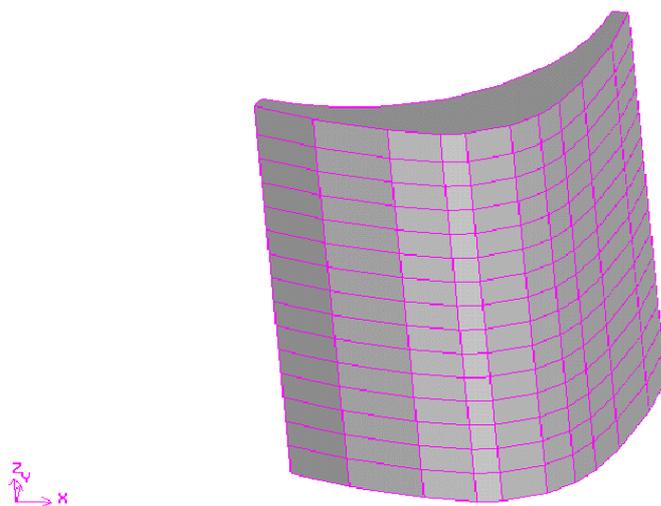


图 6 数值模拟物理模型

3.3.2 数学模型

模拟过程中，为了简化问题，作如下假设：

- a) 中庭内空气不可压缩且符合 Bossinesq 假设；
- b) 空气流动为稳态湍流；
- c) 室内空气为辐射透明介质；
- d) 不考虑漏风影响，认为室内气密性良好。

本项目采用较基准模型改进的 RNG $k-\varepsilon$ 两方程模型，速度与压力耦合采用 PISO 算法。求解区域的离散采用控制容积方法，控制容积为多面体。

3.2.3 边界条件

内外玻璃和屋顶均为定壁温边界条件，其数值由 IES <VE>和 Star-CCM+互相迭代后输出。如前所述其值已经将太阳辐射和长波辐射考虑在内，因此在数值模拟的过程中，辐射模型关闭，这样有利于模型的收敛。地面设为定热流边界条件，此设定是将中庭内部的瞬时得热量（人体、灯光、设备）简化到地面上。

中庭建筑面积为： 361m^2 ，夏季室内设计温度 26°C ，送风温度为 20°C ，送风量为： 8.8kg/s ，送风口面积为： 3.6m^2 ，回风口和排风口的情况根据不同的气流组织工况而不同，将在不同的算例中分别介绍。

4 中庭夏季热环境数值模拟结果

夏季工况三种，见表 1

表 1 夏季模拟工况表

工况 1	高 3.5 米处空调送风，同侧下回风，顶部无排风
工况 2	高 3.5 米处空调送风，同侧下回风 85%，顶部排风 15%
工况 3	高 3.5 米处空调送风，同侧下回风；同时中和面处送出 26 度办公室排风，顶部排风

以下分别为上述三种工况的模拟结果分析。

4.1 工况 1

如表 1 所示，工况 1：3.5 米处空调送风，同侧下回风，顶部无排风。

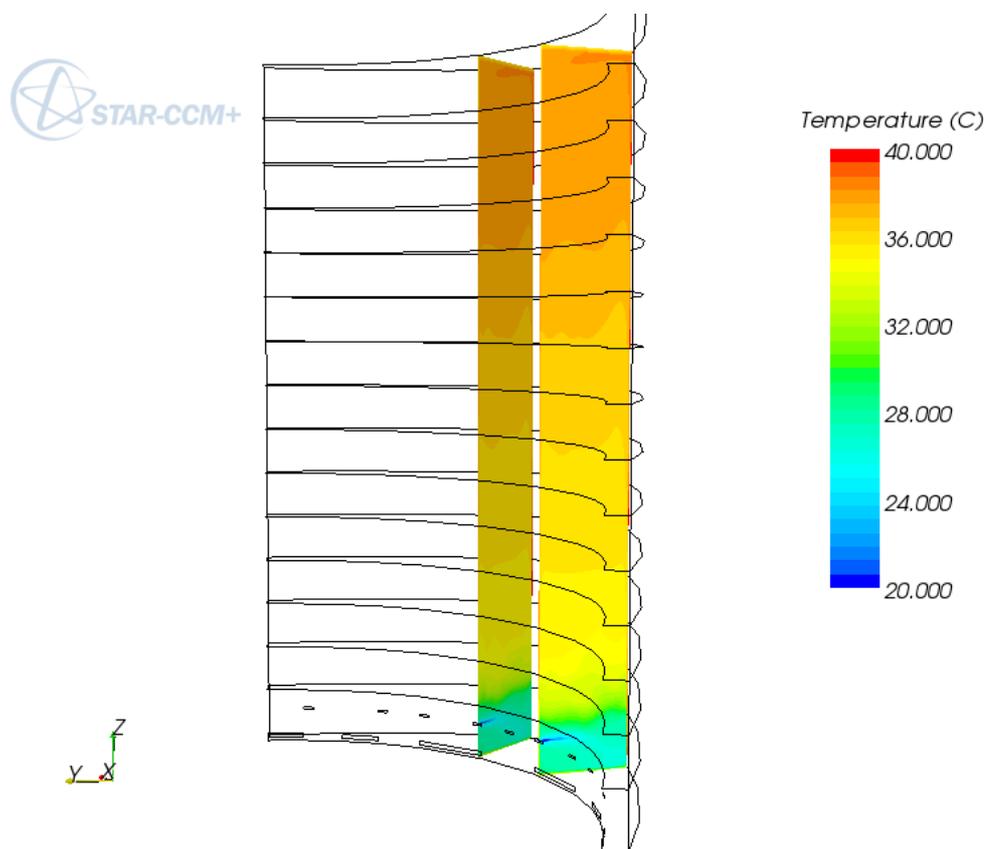


图 7 夏季工况 1 中庭垂直温度分布

图 7 为中庭某一剖面垂直温度，从图中我们可以看出，在高 1.5m 人的活动区域，温度基本控制为设计值 26°C 左右，但是由于此时为中午 12:30 左右，太阳辐射量基本为一天中的最高值，所以室内空气受太阳辐射和温室效应的影响，随着高度的增加温度逐步增高，可以看到顶部最高温度达到了 40°C 左右，四层以上中庭空气温度都在 36 到 39°C 之间，较典型气象年上海夏季空气调节室外逐

时计算温度的最高值 34.6℃还要高，因此中庭的热环境严重影响了周围办公空间的舒适度，增加了其空调耗能量。

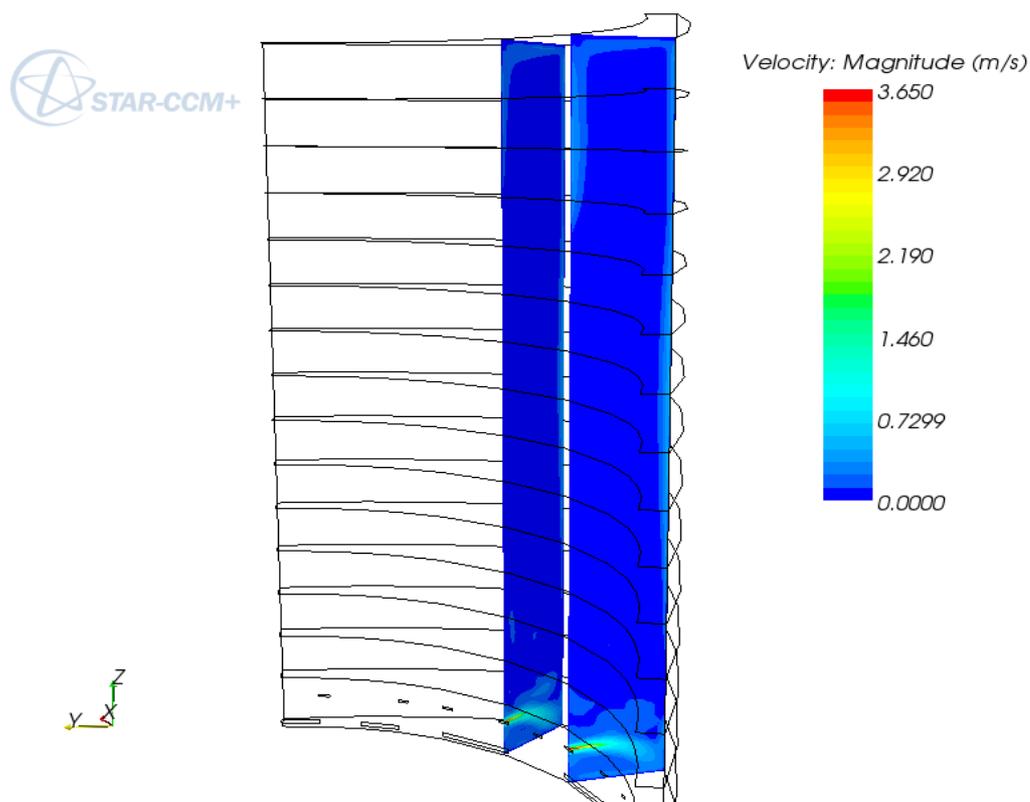


图 8 夏季工况 1 中庭垂直速度标量图

图 8 为中庭垂直速度标量图，从图中可以看到：由于外壁面直接受太阳辐射照射，其温度比较高，因此气流沿外壁面上升，而内壁面温度较低，热的空气遇到此壁面温度降低，向下流动，因此在顶部形成一个大的漩涡。而下部送风射流基本可以达到外壁面最远处，这部分气流一部分在壁面被加热然后上升，另一部分则回到回风口排出。

4.2 工况 2

鉴于工况 1 的模拟结果，工况 2 在其基础上作一些改进，即增加顶部排风，充分利用高大中庭的烟囱效应，边界条件设置为底部回风 85%，顶部排风 15%。从图 9 可以看出，上部空间的温度较工况 1 有了降低，其中最高温度降到了 38℃，但是此时最上部几层空气的温度仍然超出了上海夏季空调室外设计温度 34.6℃，即中上部中庭此时的作用仍旧是加大了办公室空调的能耗，而如果我们一味加大中庭空调的排风量的话，中庭处理新风的能耗又会增大，也许会适得其反。因此在此基础上有了工况 3 的分析，详见下节。

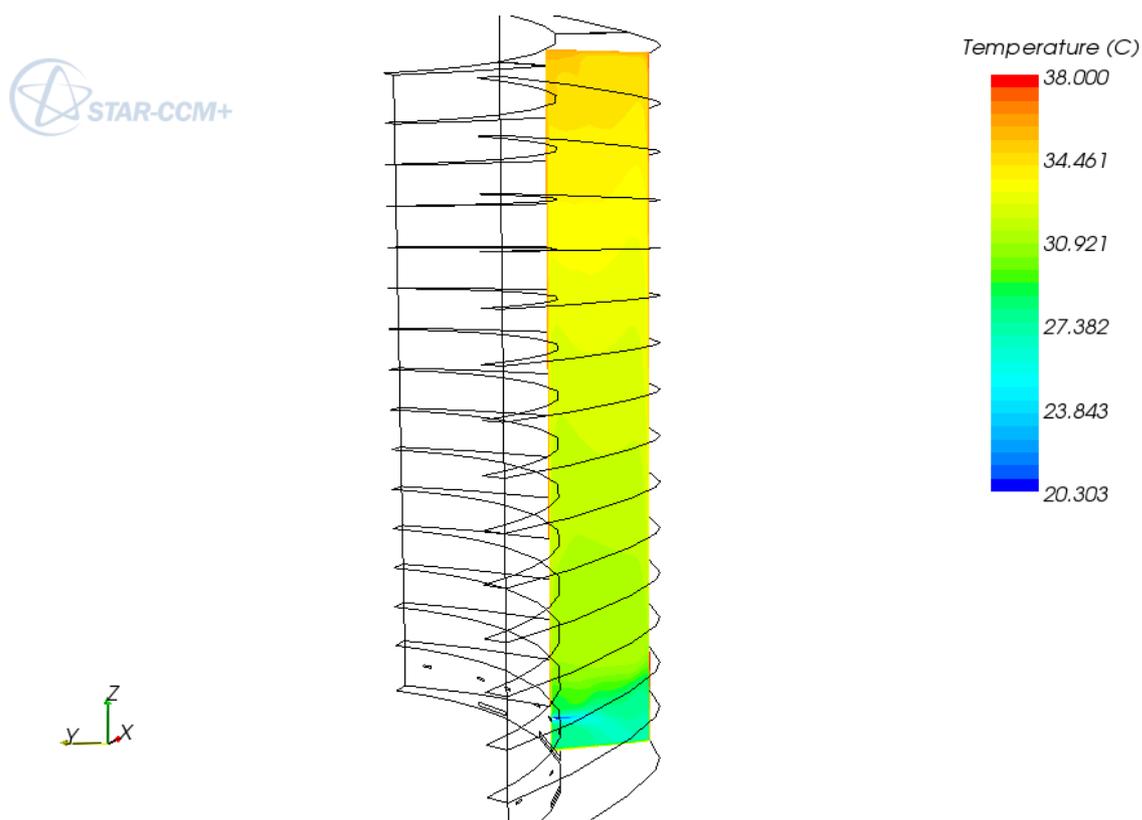


图9 夏季工况2中庭垂直温度分布

4.3 工况3

由工况2的模拟结果我们可以看出：若想降低中庭上部空间的温度，必须送入一定量的温度较低的空气，而由前面的介绍知道，中庭直接与办公空间相邻，所以工况3在工况2的基础上，选取中和面，然后在此位置送入办公空间 26°C 的空调排风，送风量由IES <VE>得出为 22.5kg/s ，送风温度 26°C 。上部排风口和下部的回风口仍然保存。

由图10工况3中庭的垂直温度分布图可以看出：中庭下部人员活动区的温度有所升高，局部达到了 28°C ，这是由于送风口2送入的气流和中庭内的空气混合，温度升高，其中的一部分从下部的回风口排出造成的。中和面以下的温度得到了很好的控制，基本保持在了 32°C 以下，低于上海夏季空调室外设计温度，而中和面以上随着高度的增加温度仍在增加，最高值为 38°C 左右，不是很理想。后来我们在顶部设置了送风口，将空调排风送入中庭内，在这种情况下，整个中庭的温度都可以控制在 34°C 以下，底部人员活动区的温度还可以继续保持在 28°C 左右，所以适当提高空调排风口的位置可以更好地改善中庭内夏季热环境。

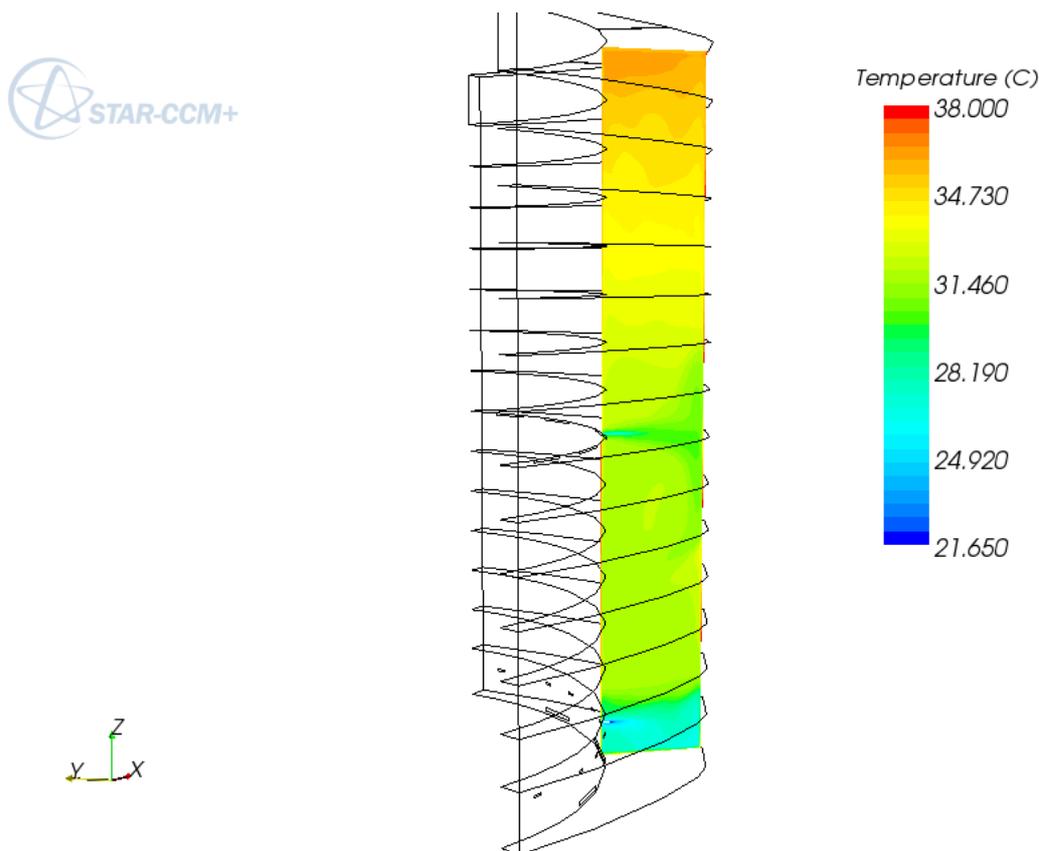


图 10 夏季工况 3 中庭垂直温度分布

5 中庭火灾模拟

当中庭发生火灾时，在“烟囱”效应的巨大作用下，中庭内的火灾会以极快的速度向上方蔓延，如何将中庭火灾控制在一定范围内，避免对建筑内人员的伤害是摆在设计师面前的一个重要课题。国内外研究表明，在火灾发生时，补风口和排风口的合理位置是控制火灾蔓延的一个重要因素，本文将对其中常见的一种布置方式进行模拟计算。

确定火灾的规模和发展过程是设计烟气控制系统的基础。火灾的发展过程一般包括点燃、增长、稳定燃烧、衰减熄灭等阶段。NFPA 美国消防设计规范在设计中庭烟气控制系统时，将火灾荷载的设计简化为两种模型：稳态火灾和非稳态火灾。放热量为常数的火灾定义为稳态火灾，火灾本质上是一个非稳态的过程，但稳态火灾是非常有用的理想模型，在很多工程应用中，采用稳态火灾模型将使设计方法更简单，结果更安全。放热量随时间变化的火灾即为非稳态火灾。对于非稳态火灾，一般采用 t^2 型火灾来近似，火灾放热量与燃烧时间的平方成正比，其热释放速率由下式计算：

$$Q = at^2$$

在本计算中所使用的热释放速率如图 11 所示。

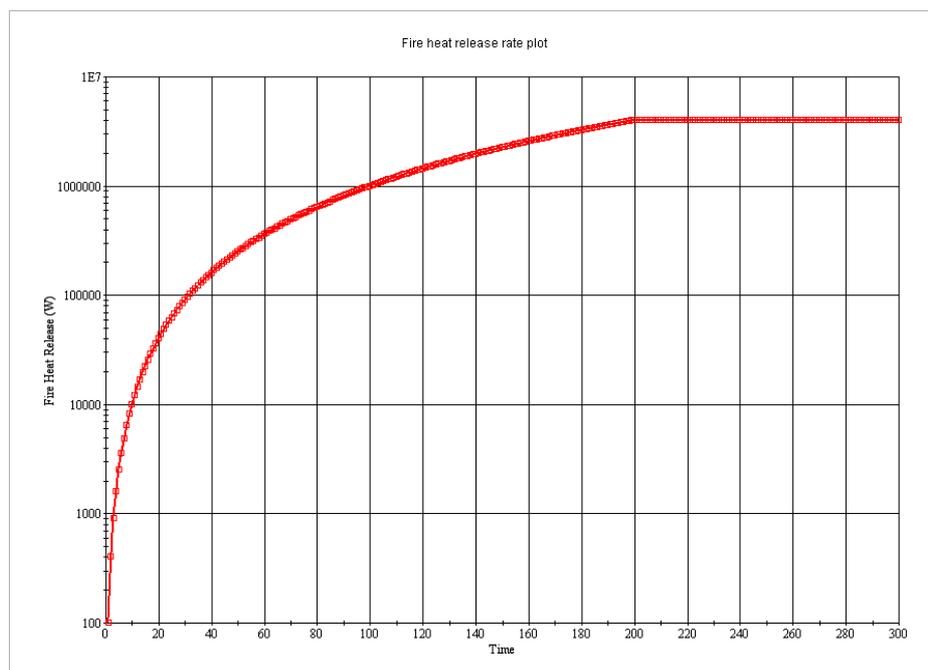


图 11 火灾热释放率

计算模型在考虑烟气扩散和蔓延时，均保守考虑自动喷水系统失效的最不利情况。火源设为为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 1\text{m}$ ，在中庭的中央，热释放率按照上面所述进行设定。补风口结合夏季空调送风口进行设定，即在高 3.5 米处，排烟口设置在顶部，内外壁面的温度均假设为 20°C ，如图 12 所示。

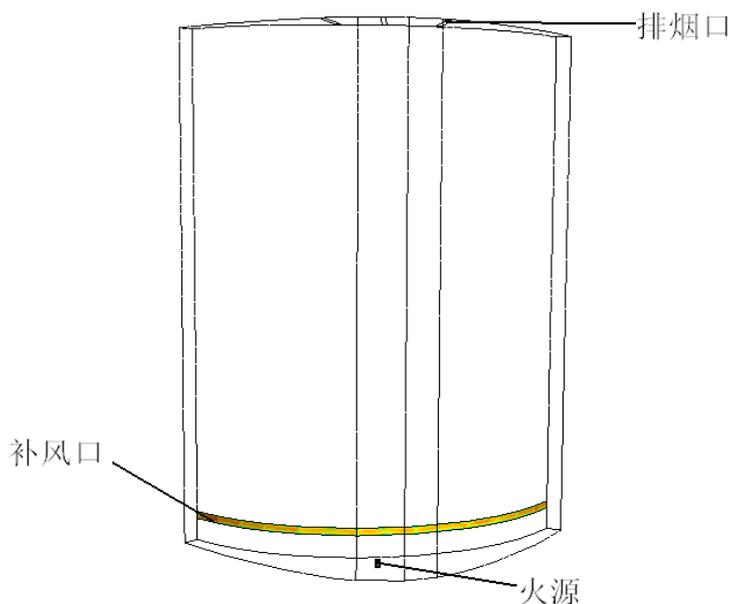


图 12 火灾计算物理模型

由图 11 知道火灾在 200 秒以后进入稳态，图 13 为 205 秒即稳态时中庭垂直剖面温度分布，从图中可以看出火源附近的温度达到了 100°C ，随着顶部排烟口不断的排烟，整个中庭的温度在中下部比较高，随着高度的上升温度有所降低。这要结合图 14 的速度图来分析，由图中我们可以看到补风口送入的空气因为具有很高的速度，因此首先将产生的烟气吹向中庭的外侧，而随着烟气的上升，在这个过程中，其逐渐与补入的低温空气混合，而使得温度逐渐降低。也正因为补风口的高风速补风，使得烟气无法进入中庭内圈，而使其温度一直保持在 20 多度，保证了人员的疏散。

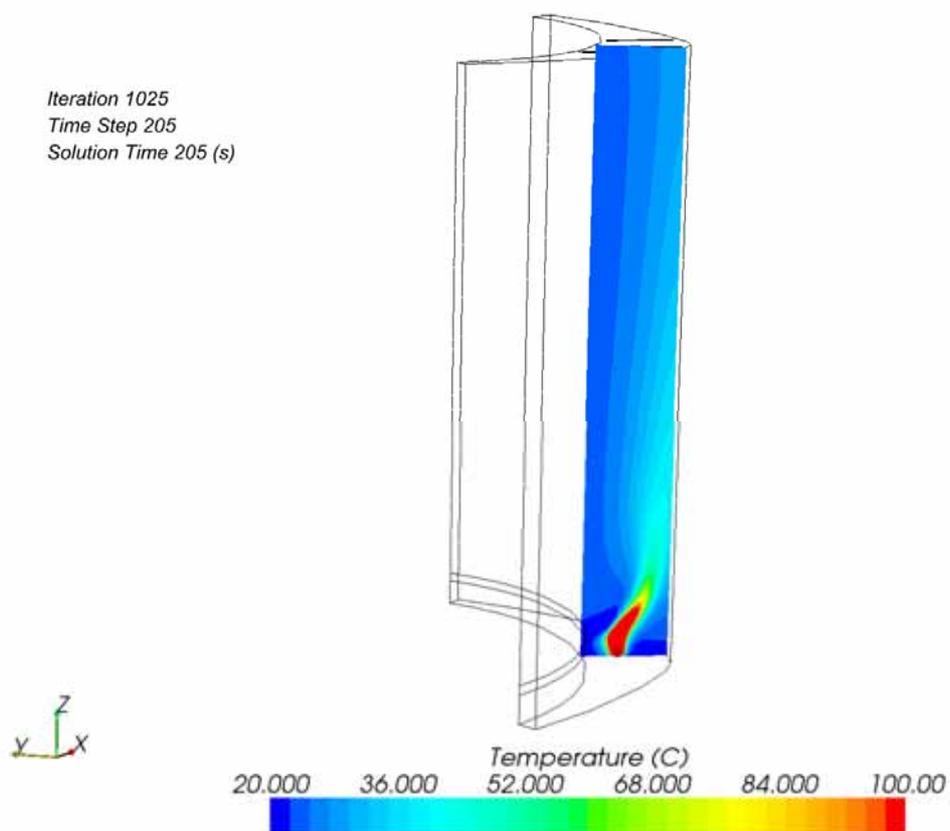


图 13 205 秒时中庭垂直剖面温度分布

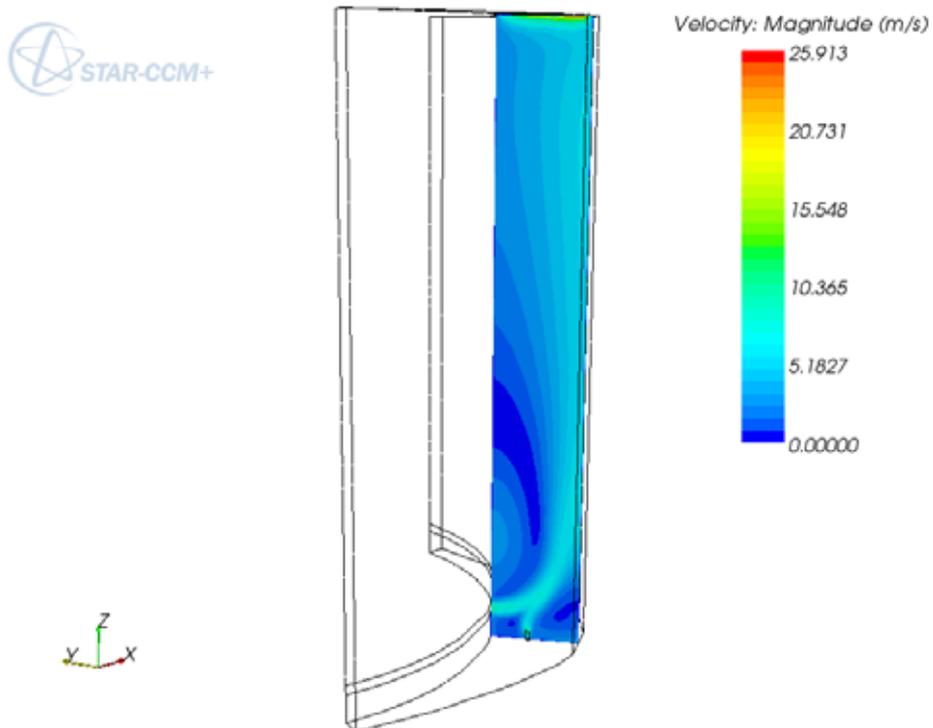


图 14 中庭垂直剖面速度标量图

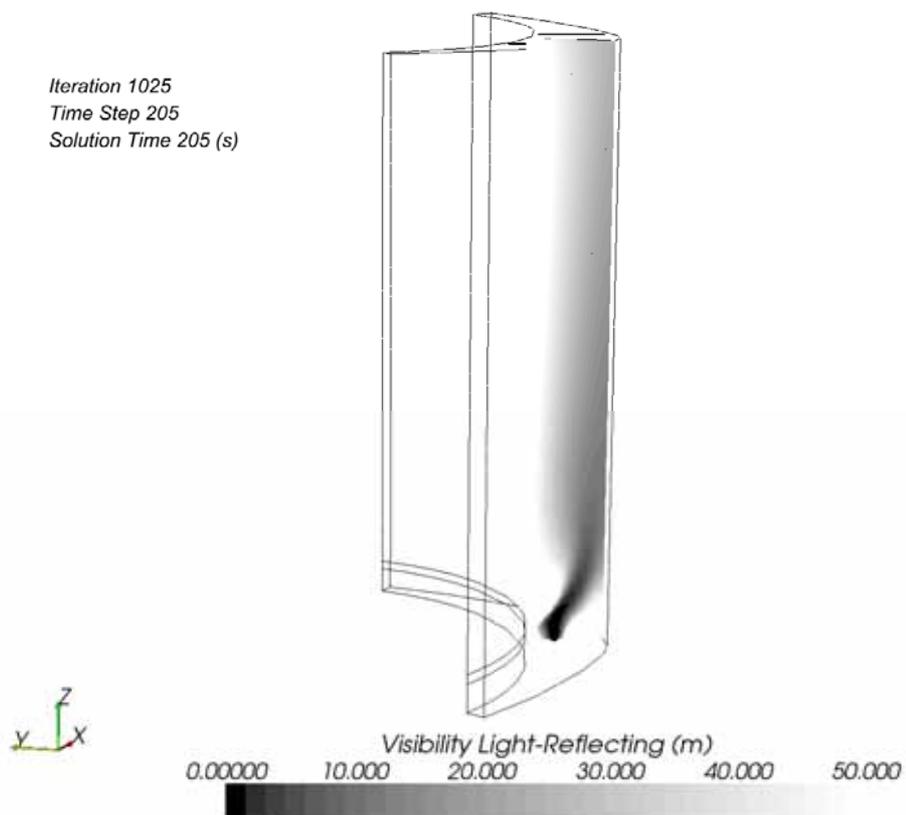


图 15 205 秒时中庭垂直剖面可见度分布

图 15 为稳态下中庭垂直剖面能见度分析图,从图中可以看出中庭的下部人员活动范围内能见度都是很高的,而上部在中庭内壁面附近,即与办公空间相邻的区域的能见度也是很高的,都大于 50 米。这一点进一步验证了在中庭内壁设置补风口的正确性。

6 结论

现将本文的结论总结如下:

(1) 上海地区全玻璃幕墙结构的中庭,受太阳辐射影响非常严重,加之高度高,室内日射得热分布不仅对空调负荷有影响,而且对室内热环境有很大影响。本课题采用联合数值模拟的方法,通过能耗模拟软件 IES <VE>进行动态模拟,将太阳辐射、长波辐射、对流换热综合考虑得出壁面温度,然后将壁面温度作为边界条件输入到 CFD 软件 Star-CCM+中,将辐射和对流解耦。这种方法具有很强的实用性,可以以较小的计算代价来研究一些相对复杂的工程问题,易掌握、流通性广、适合于工程需要。

(2) 通过计算可以得知,在传统的中庭设计中,如果只把地面附近的温度控制在舒适度范围内,在夏季会出现严重的上部空气过热问题。即使在完全封闭的中庭,其过热的温度也会对写字楼上层的舒适度及能耗产生非常大的影响。为了消除这种状况,可以充分利用中庭下部以及办公空间的空调回风来降低中庭的温度。通过计算可以看出,随着引入空调排风风口的位置逐步上移,其对中庭的降温效果更加明显。因此,在中庭设计时,应考虑在上部设置一定的排风口,将室内温度较低的空气排入中庭内,以改善中庭的温度分布。

(3) 在火灾发生的时候,高大空间使得中庭内的火灾快速向上发展,其扩散速度和强度超过普通空间内的火灾。此外,由于中庭的连通性,火灾会迅速扩展到其他楼层,因此如何把火灾尽可能限制在安全的范围内,并尽快排出烟气,是中庭消防设计的关键。通过模拟计算得出中庭发生火灾时的补风口应该设置在下部内侧,排烟口应该设置于中庭上部外侧,这样可以把高温火焰及烟气控制在中庭外侧,以保证内侧房间、楼梯间等人行区域的安全;

7 参考文献

- [1] Kato S, Murakami S, Shoya S, et al.1995.CFD analysis of flow and temperature fields in atrium with ceiling height of 130 m. ASHRAE Transactions Vol.101(2).pp 1144-1157.
- [2] 陶文铨.数值传热学(第二版).西安:西安交通大学出版社,2001
- [3] 范存养.大空间建筑空调设计与工程实录.北京:中国建筑工业出版社,2001
- [4] 村上周三 著 朱清宇 等 译.CFD 与建筑环境设计.北京:中国建筑工业出版社,2007
- [5] Wenting Ding,Yoshikazu Minegishi,Yuji Hasemi.Smoke control based on a solar-assisted ventilation system.building and environment(39)2004