

DOI:10.11784/tdxbz201506019

过渡季节某大型阶梯教室内热环境的数值分析

陶文铨, 徐 晋

(西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘 要: 教室环境对学生的学习效率有着不可忽视的影响. 为此, 利用数值模拟的方法研究了西安某大学一座大型独立阶梯教室内的热环境, 并评价了其对室内人员舒适性的影响. 将模拟季节选在一年中的过渡季节(环境温度处于 $5 \sim 17^{\circ}\text{C}$), 并选择了有代表性的教室内窗户关闭、学生穿着热阻为 1 clo 服装的情景. 计算结果显示: 当环境温度从 7°C 变化到 15°C 时, 教室内学生、教师的体表温度和教室平均温度均随环境温度同程度提高. 结果还表明: 在环境温度较低时($7 \sim 10^{\circ}\text{C}$), 位于教室前排, 以及靠近外墙、过道、后门的同学体表温度低, 教室内热环境的舒适性指标远低于舒适范围的下限; 在环境温度较高时(15°C 左右), 教室内热环境基本可以满足舒适性要求.

关键词: 过渡季节; 大型阶梯教室; 热环境; 热舒适; 数值模拟

中图分类号: TU834.51

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2016)02-0143-08

Numerical Investigation on the Thermal Environment of a Large Lecture Theater in Transient Seasons

Tao Wenquan, Xu Jin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The study efficiency of students is strongly subjected to the environment in the classroom. This paper studied the thermal environment of a large independent lecture theatre in Xi'an by means of numerical simulation and evaluated its effect on the thermal comfort of the people indoor. The transient season was chosen as the simulated period (the outside temperature is between 5°C to 17°C). Moreover, the scene of window closed and students wearing 1 clo clothing was selected as a representative situation. The computational results show that the students' and the teacher's surface temperatures with cloth and the average temperature in the lecture theatre increase equally to the growth of outside temperature (rising from 7°C to 15°C). The results also show that students in the front rows and near the external walls, pass ways and doors have a low surface temperature and the comfort index of the thermal environment in the lecture theatre is far below the minimum value of the recommended comfort range when the temperature outside is low (7°C to 10°C). However, the people in the lecture theater can obtain a satisfying thermal environment when the temperature outside is high (about 15°C).

Keywords: transient seasons; large lecture theater; thermal environment; thermal comfort; numerical simulation

现代城市中, 很多人 80% ~ 90% 的时间都是在室内度过^[1]. 室内环境的优劣严重影响着人们的舒适感和工作效率^[2]. 为此, 学术界与工程领域广泛开展了改善室内环境的研究. 闫凤英等^[3]采用 CFD 的方法对某小区高层住宅建筑中的两种户型在自然通风情况下的热环境进行了模拟分析, 比较了两种户型的

优劣. 孙贺江等^[4]对客机驾驶舱内的热环境进行了模拟和分析, 找出了引起机舱内人员不舒适的原因.

但是目前关于学校室内环境的研究尚鲜见报道^[5]. 教室作为一类特定的室内环境, 有不同于其他室内环境的特点: 空间内存在较多的使用者且排列整齐, 位置相对固定; 室内陈设相对简单. 目前关于教

收稿日期: 2015-06-09; 修回日期: 2015-07-07.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228304).

作者简介: 陶文铨(1939—), 男, 教授.

通讯作者: 陶文铨, wqtao@mail.xjtu.edu.cn.

网络出版时间: 2015-07-08. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1127.N.20150708.1117.001.html>.

室内热环境的研究主要针对有空调服役的教室^[5-7],然而过渡时期(不开空调或者采暖器)在一年中也占了很长时间. 根据我国冬季供暖标准(GB 50176—93《民用建筑热工设计规范》),我国北方地区的城镇采暖期限是按照室外日平均温度小于等于 5℃计算,也就是当室外日平均温度小于等于 5℃时开始采暖,而当室外日平均温度大于 5℃时停止采暖,因此研究室外气温处于 5~17℃这一过渡时期内的室内温度分布具有重要意义. Wang 等^[8]研究了过渡时期内德国一间容纳 30 位学生和 1 位教师的教室在具有通风设施情况下的室内环境,得出了室内温度分布和供给风速、温度之间的关系;但是该研究中教室内有专门的通风设施.

目前国内尚有很多教室没有配备通风设施,而且开窗通风严重不足. 本文针对西安某大学中常见的大型阶梯教室(容纳学生数量超过 300 位,在过渡季节内没有任何专门的通风设施和空调设备),仅考虑人体散热,采用数值模拟的方法分析了在不同的室外环境温度下,教室内的热环境情况和其对室内人员热舒适性的影响.

1 物理模型

图 1 所示为典型的大型阶梯教室布局情况. 根据实际阶梯教室尺寸建立几何模型,如图 2 所示.



图 1 典型大型阶梯教室
Fig.1 Typical large lecture theatre

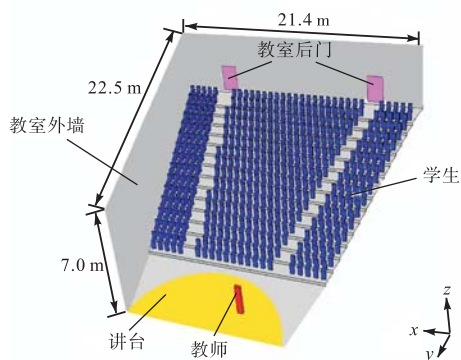


图 2 阶梯教室的几何模型
Fig.2 Geometric model of the lecture theatre

教室前方讲台上站立 1 位教师,阶梯上有 388 位学生. 所研究阶梯教室内的热环境条件为:阶梯教室只有后 2 扇门开启,学生和教师为热源,外墙全部为第 3 类对流边界条件,不考虑太阳辐射. 教师和学生的位置与外形均固定,几何模型如图 3 所示. 站立的教师简化为高度 1.75 m、表面积 1.8 m²的长方体;坐着的学生简化为 3 个长方体组合,组合后总高度为 1.20 m、表面积约为 1.7 m².

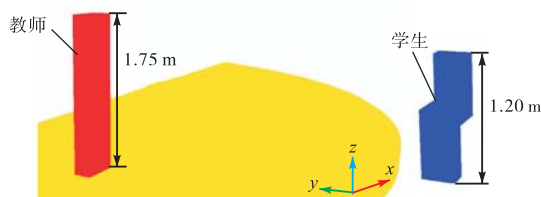


图 3 教师与学生的几何模型
Fig.3 Geometric models of the teacher and the student

2 数学模型

2.1 控制方程

本文数学模型控制方程如下^[9].

连续性方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial y_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial y_j} = -\frac{\partial p}{\partial y_i} + \frac{\partial}{\partial y_j} \left(\eta \frac{\partial u_i}{\partial y_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

能量方程为

$$\rho \frac{\partial (u_i T)}{\partial y_j} = \frac{\partial}{\partial y_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y_j} \right) + S_T \quad (3)$$

湍动能方程为

$$\begin{aligned} \rho u_j \frac{\partial k}{\partial y_j} &= \frac{\partial}{\partial y_j} \left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y_j} + \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial y_j} \cdot \\ &\quad \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j} + \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \right) - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (4)$$

湍动能耗散方程为

$$\begin{aligned} \rho u_k \frac{\partial \epsilon}{\partial y_k} &= \frac{\partial}{\partial y_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y_k} + \frac{c_1 \epsilon}{k} \eta_t \cdot \right. \\ &\quad \left. \frac{\partial u_i}{\partial y_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j} + \frac{\partial u_j}{\partial y_i} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$i, j = 1, 2, 3$$

式中: y 为坐标; u 为速度, m/s; T 为温度, K; ρ 为密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²; λ 为导热系数, W/(m·K); c_p 为比定压热容, J/(kg·K); p 为压力,

Pa ; η 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k 为湍动能, J/kg ; ε 为湍动能耗散率, m^2/s^3 ; η_t 为涡黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $c_1 = 1.14$; $c_2 = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

本文只在重力项中考虑空气密度随温度的变化, 满足 Boussinesq 假设.

2.2 边界条件

2.2.1 外墙边界

由于所研究的阶梯教室是一个独立建筑, 所有墙体均为外墙, 故采用第 3 类对流边界条件, 取工程上在过渡时期常用的复合换热系数 $h = 34 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^{[10]}$, 外墙厚度为 370 mm 、导热系数为 $0.77 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 屋面厚度为 400 mm 、导热系数为 $0.52 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{[11]}$.

2.2.2 热源

鉴于这类大型阶梯教室一般用于大班上课和大型讲座会议, 所以假定阶梯教室的利用率为 100% , 本阶梯教室最多可以容纳 388 位学生. 坐着的学生为 $70 \text{ W}/\text{m}^2$ 的热源, 站着的教师为 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 的热源^[11].

2.2.3 压力出口

上课时阶梯教室后 2 扇门均为开启状态, 作为阶梯教室的唯一通风口. 将阶梯教室门设置为压力出口, 出口压力、出口温度与环境参数相同.

2.2.4 室内辐射

由于计算区域内存在热源(学生和教师), 需要考虑热源间以及热源与其他壁面间的相互辐射作用. 本文采用离散坐标模型^[10].

2.2.5 着装热阻

穿衣能够改变人体体表的热环境, 起到保暖作用. 穿衣的厚度以穿衣指数来表达(衣服热阻单位为 clo). 在不考虑空气热阻、蒸发及气流等作用时, 1 clo 的衣着能保持衣服两侧的温度差为 9°C , 此时环境温度为 24°C 时就能保持人体表面温度(体表温度)为舒适的 33°C . 体表温度在 $35\sim 37^\circ\text{C}$ 时人们会逐渐感到炎热, $33\sim 34^\circ\text{C}$ 时最为适宜, $31\sim 32^\circ\text{C}$ 时就会有凉的感觉^[12]. 有研究表明, 自然通风建筑中人员在过渡季节的服装热阻大致在 $0.6\sim 1.0 \text{ clo}^{[13]}$.

本研究中假设学生与教师都内穿衬衣、外套普通外套, 其热阻为 $1 \text{ clo}^{[11]}$. 下文讨论中, 体表温度都是指人体着装后的服装外温度.

2.2.6 其他

由于阶梯教室内一般都配备良好的遮光设备, 如百叶窗帘等, 所以不考虑太阳辐射对教室的影响. 地面为绝热边界.

3 模型验证及网格独立性

3.1 模型验证

Liu 等^[14]实验研究了一间有 6 位使用者作为热源的空调办公室(如图 4 所示)内的温度分布. 为了检验本文中使用的数值模型(辐射模型、热源模型等)的可靠性, 对文献[14]中的办公室进行了模拟, 并将得到的结果与其实验值进行了比较, 结果如图 5 所示. 实验测点位于同一竖直面($x = 3 \text{ m}$)上的不同水平高度上($z = 0.1, 0.6, 1.1, 1.8 \text{ m}$). 由图 5 可以看出, 本文的模拟值比实验值偏小, 但是最大误差不超过 5.45% , 满足工程精度的要求, 说明本文模型可以正确反映实际情况.

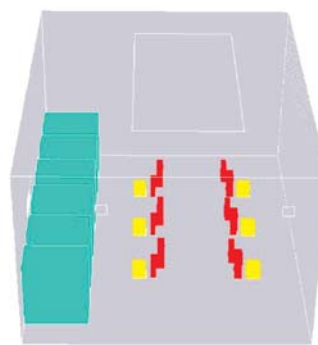


图 4 办公室的几何模型

Fig.4 Geometric model of the office

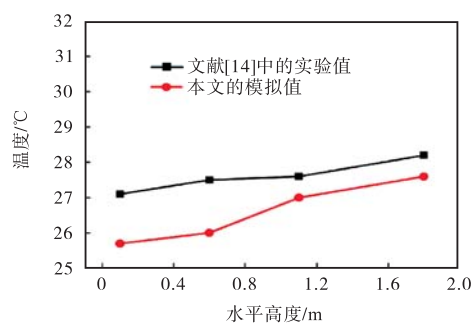


图 5 数值模拟的温度与实验值比较

Fig.5 Comparison between the simulated temperature and the measured value

3.2 网格独立性检验

本文采用 Workbench 中的 mesh 模块自动生成网格. 该模块中通过给定局部的网格尺寸加密网格, 通过确定模型不同部分网格生成的先后顺序来达到控制网格的目的. 考虑到阶梯教室内人员的重要性, 本研究中对人体的局部网格采用最小的网格尺寸(相对于大空间加密的网格, $y^+ = 21.5$)和最先的生成顺序. 表 1 是不同网格尺寸下阶梯教室的平均温度. 可

以看出,以最小网格尺寸 10 mm 为参考值、最小网格尺寸为 15 mm 时,阶梯教室平均温度随网格尺寸的变化已经小于 1%,故本文采用的网格系统的最小尺寸为 15 mm,总网格数为 2 650 000.

表 1 不同网格尺寸下阶梯教室的平均温度

Tab.1 Average temperatures of the lecture theatre under different grid sizes

最小网格尺寸/mm	教室平均温度/℃	相对偏差/%
20	13.4	3.4
15	13.8	0.7
10	13.9	—

4 结果与讨论

本文采用 CFD 方法,研究过渡季节不同室外温度下,某大型阶梯教室(以下简称教室)内在没有任何空调设备及通风设施情况下的热环境.由于没有任何空调或通风设施,窗户也处于关闭状态,整个室内空气处于自然流动状态,故本文主要从温度角度分析室内人员周围的热环境,并用教室的平均热感觉指标来分析考虑风速、湿度等其他因素时的室内热舒适性.所用 CFD 软件为 ANSYS FLUENT 14.5,主要结果如下所述.

4.1 室外温度为 7℃ 时的热环境

4.1.1 学生和教师体表温度分布

图 6 所示为教室内所有学生和教师的体表温度分布.

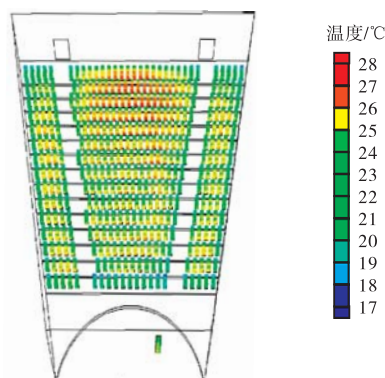


图 6 室外温度为 7℃ 时学生和教师体表温度分布

Fig.6 Surface temperature distribution of the students and the teacher when the outside temperature is 7℃

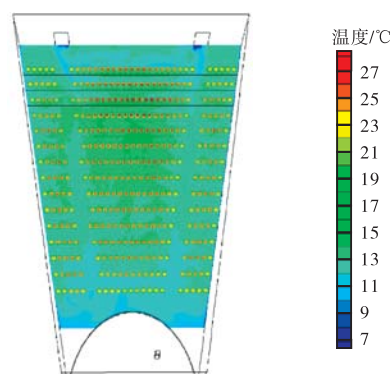
由图 6 可以看出,学生的温度分布有 3 个特点:①前排学生的体表温度低于后排学生的温度;②靠墙学生的体表温度低于中间学生的温度;③靠两边过道学生的体表温度低于位置靠里学生的温度.造成这

种分布的原因是教室中间人群更为密集,学生释放的热量不易散出;靠墙位置的学生与墙体辐射作用较强,学生向墙体辐射很多热量,导致自身温度降低;前排学生和靠近过道的学生周围热源减少,体表温度降低.

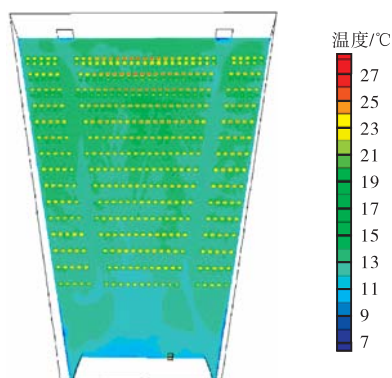
图 6 中,前排及靠墙一排的学生体表温度在 20℃ 左右,则皮肤温度低于 30℃;而在中部和两侧,大多数学生体表温度在 21~22℃ 之间;学生人数最为密集的中后排,体表温度在 25℃ 左右;教师的体表温度较高,保持在 24℃.虽然教师处于热源稀少的教室前部,但是教师温度高于前排学生温度,这是因为教师站立时产生的热量要高于坐着的学生.

4.1.2 不同倾斜面上的温度分布

在室外温度为 7℃ 时,教室内学生头部所在平面和脚部所在平面的温度分布如图 7 所示,由于本文的研究对象为阶梯教室,所有学生头部与脚部所在平面均为平行于教室阶梯面的倾斜平面,故下文中坐标 z 的方向均垂直于该倾斜面.



(a) $z = -0.6$ m (脚部所在平面)



(b) $z = 0.3$ m (头部所在平面)

图 7 室外温度为 7℃ 时不同平面上的温度分布

Fig.7 Temperature distributions in different planes when the outside temperature is 7℃

由图 7(a)可以看出,在 $z = -0.6$ m 平面时,教室后门的开启对教室后排的学生影响较大,使最后一排

学生周围的环境温度只能维持在 $12 \sim 13^\circ\text{C}$. 值得指出的是, 前排也维持在很低的温度 ($11 \sim 12^\circ\text{C}$).

由图 7(b) 可以看出, 当 $z = 0.3\text{ m}$ 时, 教室后门的开启对教室内温度分布的影响长度已经明显缩小, 只有在门附近的一段很短距离内温度比较低, 已经对后排学生的头部没有什么影响, 而且教室前排的环境温度也有所提升.

4.1.3 教室中心截面上的空气流动

图 8 是教室中心截面上的空气流动矢量. 可以看出: 教室前排学生附近流动的空气速度大 (平均风速在 $0.2 \sim 0.3\text{ m/s}$)、温度低 (12°C 左右), 这是造成前排学生体表温度较低的重要原因; 相比于前排, 教室后排学生附近空气流动速度缓慢 (0.1 m/s 以下) 且空气温度较高 (在 17°C 以上), 这为后排学生保持一个较高的体表温度提供了有力的保证; 另外, 由于人体散热形成的热气流上升, 教室人员周围上部空间的温度要稍高于下部的温度.

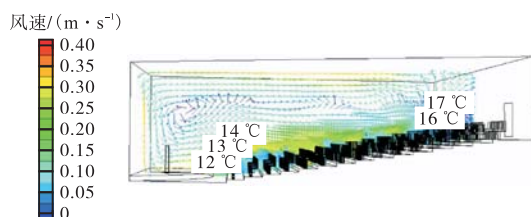


图 8 教室中心截面上的空气流动矢量

Fig.8 Air flow vector in the middle plane of the lecture theatre

4.2 室外温度为 10°C 时的热环境

4.2.1 学生和教师体表温度分布

图 9 为室外温度为 10°C 时, 该教室内学生和教师的体表温度分布.

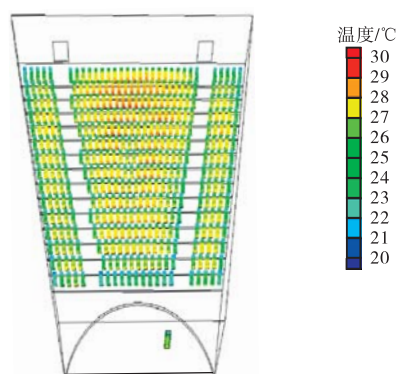


图 9 室外温度为 10°C 时学生和教师体表温度分布

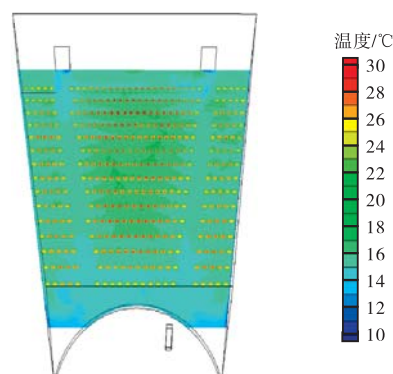
Fig.9 Surface temperature distribution of the students and the teacher when the outside temperature is 10°C

由图 9 可见, 室外温度为 10°C 时, 室内学生和教师的温度分布趋势与室外温度为 7°C 时大致相同.

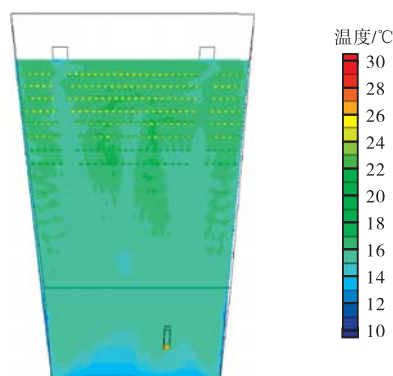
由图 9 可以看出: 前排及靠墙一排的学生体表温度在 23°C 左右, 比室外温度为 7°C 时的体表温度高 3°C ; 教室中部和教室两侧, 大多数学生体表温度在 $25 \sim 26^\circ\text{C}$, 比室外温度为 7°C 时的体表温度高 $3 \sim 4^\circ\text{C}$; 学生人数最为密集的中后排, 学生体表温度已经达 $27 \sim 28^\circ\text{C}$, 比室外温度为 7°C 时的体表温度高 3°C 左右; 教师的体表温度在 25°C 左右, 比室外温度为 7°C 时的体表温度只高出 1°C .

4.2.2 不同倾斜面上的温度分布

室外温度为 10°C 时, 教室内学生头部所在平面和脚部所在平面的温度分布如图 10 所示.



(a) $z = -0.6\text{ m}$ (脚部所在平面)



(b) $z = 0.3\text{ m}$ (头部所在平面)

图 10 室外温度为 10°C 时不同平面上的温度分布

Fig.10 Temperature distributions in different planes when the outside temperature is 10°C

由图 10 可以看出, 室外温度为 10°C 时, 倾斜面上的温度分布趋势与室外温度为 7°C 时的大致相同. 在图 10(a) 中 $z = -0.6\text{ m}$ 平面上, 后门的开启对后排的学生影响较大, 使最后一排学生周围环境温度只能维持在 16°C 左右; 前排的温度也在 15°C 左右. 在图 10(b) 中, 当 $z = 0.3\text{ m}$ 时, 后门的开启对教

室内温度分布的影响进一步缩小,而前排的环境温度也有更大的提升.

4.3 室外温度为 15 °C 时的热环境

4.3.1 学生和教师体表温度分布

在室外温度为 15 °C 时,教室内学生头部所在平面和脚部所在平面的温度分布如图 11 所示.

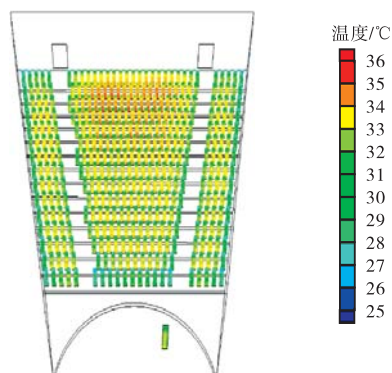


图 11 室外温度为 15 °C 时学生和教师体表温度分布

Fig.11 Surface temperature distribution of the students and the teacher when the outside temperature is 15 °C

由图 11 可见:室外温度为 15 °C 时,室内学生和教师温度分布趋势与室外温度为 7 °C 时和 10 °C 时的大致相同;前排及靠墙一排的学生体表温度在 29 °C 左右,比室外温度为 10 °C 时的高 6 °C;在教室中部和两侧,大多数学生身体温度在 31 ~ 32 °C,比室外温度为 10 °C 时的体表温度高 6 °C 左右;学生人数最为密集的中后排,学生体表温度已经达 33 ~ 34 °C,比室外温度为 10 °C 时的体表温度高 6 °C 左右;教师的体表温度在 31 °C 左右,比室外温度为 10 °C 时的体表温度高出 6 °C.

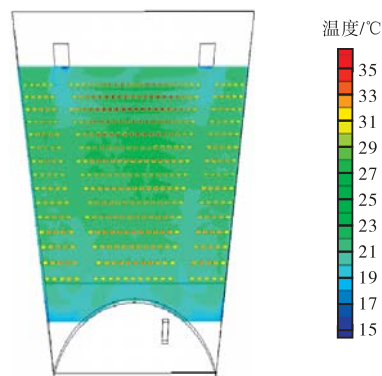
4.3.2 不同倾斜面上的温度分布

在室外温度为 15 °C 时,教室内学生头部所在平面和脚部所在平面的温度分布如图 12 所示.

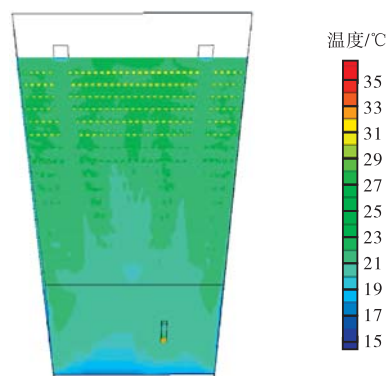
由图 12 可以看出:室外温度为 15 °C 时,教室后门的开启和前排大空间对室内温度分布的影响已经比室外温度为 7 °C 和 10 °C 时小.在图 12(a)中 $z = -0.6$ m 平面上,教室后门开启,后排学生的体表温度也能达到 22 °C 左右;值得指出的是,教室前排的温度也维持在 22 ~ 23 °C.在图 12(b)中, $z = 0.3$ m 时,教室后门对教室内温度分布的影响长度已经明显缩短,对后排学生的头部很难造成影响;前排温度也有大幅度提升.

4.4 室内温度随室外温度的变化

图 13 是学生体表温度、教师体表温度和教室平均温度随室外环境温度变化的曲线.



(a) $z = -0.6$ m (脚部所在平面)



(b) $z = 0.3$ m (头部所在平面)

图 12 室外温度为 15 °C 时不同平面上的温度分布

Fig.12 Temperature distributions in different planes when the outside temperature is 15 °C

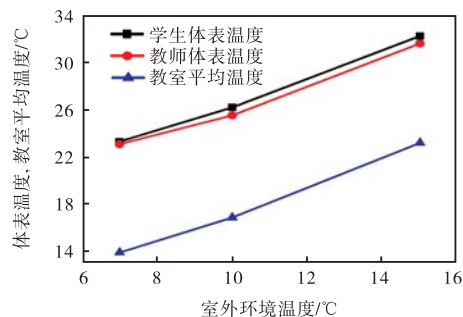


图 13 学生体表温度、教师体表温度和教室平均温度随室外环境温度的变化

Fig.13 Variations of the surface temperature of students and the teacher, and the average temperature of the lecture theatre with the outside temperature

从图 13 可以看出:学生体表温度、教师体表温度和教室平均温度都随室外环境温度呈线性变化,且变化的斜率也都十分接近.换句话说,室外环境温度的升高会引起本研究中的教室内整体温度同程度地升高.

4.5 不同室外温度下教室内的热舒适性

综合考虑空气温度、湿度、风速、平均辐射温度、着装、散湿等各种影响人体舒适度的因素,采用丹麦

学者 Fanger 提出的热感觉指标 PMV (predicted mean vote) 评价教室的整体热舒适性^[3]。

表 2 给出了不同环境温度下确定教室内整体 PMV 值所需的参数和计算结果。表中： t_{out} 为环境温

度， M 为新陈代谢率， p_w 为水蒸气分压力， h_c 为人体与环境的表面对流换热系数， t_a 为学生周围空气的温度， t_r 为平均辐射温度，PMV 为预测平均热感觉指标。表 3 为不同的 PMV 值对应的热感觉等级。

表 2 不同环境温度下的 PMV 值及相关参数

Tab.2 PMV values and related parameters under different outside temperatures

$t_{out}/^{\circ}\text{C}$	$M/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	p_w/Pa	$h_c/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$t_a/^{\circ}\text{C}$	$t_r/^{\circ}\text{C}$	PMV
7	70	1 069	7.76	15.5	13.9	-2.64
10	70	1 379	5.43	18.1	16.8	-1.81
15	70	1 943	3.58	23.6	23.1	-1.09

表 3 热感觉等级

Tab.3 Thermal sensation scales

PMV	热感觉
-3	寒冷
-2	凉
-1	稍凉
0	热舒适
1	稍暖
2	暖
3	热

由表 2 中的 PMV 值可以看出，当环境温度在 7 $^{\circ}\text{C}$ 时，教室的平均 PMV 值为 -2.64，处于凉与寒冷之间，此时大多数学生会有冷的感觉。当环境温度在 10 $^{\circ}\text{C}$ 时，教室的平均 PMV 值为 -1.81，处于凉与稍凉之间，此时大多数学生会有凉的感觉。当环境温度在 15 $^{\circ}\text{C}$ 时，教室的平均 PMV 值为 -1.09，基本接近一般认为比较舒适的热环境的范围（-1.0 < PMV < 1.0）。

5 结 语

本文针对西安某大学中的一座大型独立阶梯教室在过渡季节没有任何空调设施和机械通风设施，仅考虑人体散热情况进行了数值研究，得出了不同室外环境温度下教室内的温度分布情况和对室内人员的热舒适影响，并得到以下结论。

在室外温度较低时（7 ~ 10 $^{\circ}\text{C}$ ），教室中靠墙壁、过道及前排的学生，都会因冷空气的流动及周围热源较少等原因而引起体表温度低，教室内的预测平均热感觉指标（PMV 值在 7 $^{\circ}\text{C}$ 和 10 $^{\circ}\text{C}$ 时分别为 -2.64 和 -1.81）也远低于舒适范围（-1.0 < PMV < 1.0）的下限。在非供暖期，教室内需要配备一些辅助取暖设施，如热泵或电加热设施等，来保证教室内人员的舒

适性。当室外温度上升时（15 $^{\circ}\text{C}$ 左右），教室内学生和教师的体表温度都比较高，教室内的预测平均热感觉指标（PMV = -1.09）也比较接近舒适范围。

参考文献：

- [1] Wyon D P. The effects of indoor air quality on performance and productivity[J]. *Indoor Air*, 2004, 14 (Suppl 7): 92-101.
- [2] 王汉青. 暖通空调流体流动数值计算方法与应用[M]. 北京：科学出版社，2013.
Wang Hanqing. *The Numerical Computation Method and the Application of the Fluid Flow in HVAC*[M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [3] 闫凤英，王新华，吴有聪. 基于 CFD 的室内自然通风及热舒适性的模拟[J]. 天津大学学报，2009，42(5)：407-412.
Yan Fengying, Wang Xinhua, Wu Youcong. Simulation of interior natural ventilation and thermal comfort based on CFD[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(5)：407-412 (in Chinese).
- [4] 孙贺江，安 璐，冯壮波，等. 客机驾驶舱流场 CFD 模拟与热舒适性分析[J]. 天津大学学报：自然科学与工程技术版，2014，47(4)：298-303.
Sun Hejiang, An Lu, Feng Zhuangbo, et al. CFD simulation and thermal comfort analysis in an airliner cockpit[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2014, 47(4)：298-303 (in Chinese).
- [5] Karimipناه T, Awbi H B, Sandberg M, et al. Investigation of air quality, comfort parameters and effectiveness for two floor-level air supply systems in classrooms [J]. *Building and Environment*, 2007, 42(2)：647-655.
- [6] Jovanovi M, Vucecevi B, Turanjanin V, et al. Investigation of indoor and outdoor air quality of the classrooms

- at a school in Serbia[J]. *Energy*, 2014, 77: 42-48.
- [7] Cheong K W D, Junaedy E D, Chua Y L, et al. Thermal comfort study of an air-conditioned lecture theatre in the tropics[J]. *Building and Environment*, 2003, 38: 63-73.
- [8] Wang Yang, Zhao Fuyun, Kuckelkorn J, et al. Classroom energy efficiency and air environment with displacement natural ventilation in a passive public school building[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 70: 258-270.
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- Tao Wenquan. *Numerical Heat Transfer*[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001(in Chinese).
- [10] Horikiri Kana, Yao Yufeng, Yao Jun. Modelling conjugate flow and heat transfer in a ventilated room for indoor thermal comfort assessment[J]. *Building and Environment*, 2014, 77: 135-147.
- [11] 徐 勇. 通风与空气调节工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- Xu Yong. *The Engineering of the Regulation in the Ventilation and the Air Conditioning*[M]. Beijing: China Machine Press, 2004(in Chinese).
- [12] 徐大海, 朱 蓉. 人对温度、湿度、风速的感觉与穿衣指数的分析研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(4): 430-438.
- Xu Dahai, Zhu Rong. The feeling of the human towards the temperature, humid, and the air velocity and the analysis on the dressing index[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2000, 11(4): 430-438(in Chinese).
- [13] 雷丹妮. 服装对人体热舒适影响的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2012.
- Lei Danni. Experiment Research of Effects of Clothes on Human Thermal Comfort[D]. Chongqing: Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, 2012(in Chinese).
- [14] Liu Jing, Pei Qingqing. Numerical simulation and experiment study of indoors thermal environment in summer air-conditioned room[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 52: 230-235.

(责任编辑: 金顺爱)