

第三类边界条件的人体耦合散热及热舒适性方面的研究

Research Of Third Boundary Condition With Human Body Coupled Heat And Thermal Comfort

李 超

(中南大学能源科学与工程学院 长沙 410075)

摘 要: 从人体建模、网格划分、边界条件的处理、湍流模型的选择及模拟结果分析等方面系统地介绍了如何利用STAR-CCM+进行人体散热的数值模拟以及舒适性分析。在相同工况条件下,完成了基于三类边界条件的人体换热的数值模拟计算,经分析比较后指出第一类、第二类边界条件模拟的种种弊端和在反映人体舒适性问题方面的不足,然而与场函数结合的第三类边界条件具有自动适应周围流场的特点,其模拟结果能更为精确地反映人体各部位的散热量,从而反映各部位的冷暖感觉,证明了文中的方法在研究人体散热及舒适性问题上是可行的。

关键词: 人体散热; STAR-CCM+; 第三类边界条件; 热舒适性

Abstract: From the point of view in human body model, grid meshing, boundary condition treatment, turbulence model selection and comparison of simulation results, how to use STAR-CCM+ to make the simulation of human body heat and analyze the comfortability is introduced in this paper systematically. Under the same working conditions, numerical simulation of human body heat transfer has been finished based on the three boundary conditions, the results are compared. The results show that the third boundary condition is better than the first and the second one, which has some problems in simulation and is not good at reflecting the fact on comfortability of human body. However, the third boundary condition which is made to adapt the surrounding flow field automatically with the method of field function programming can get a more accurate result on calculating the heat transfer of different parts on human body and reflect hot or cool feeling preferably, which proves that the method put forward in this article offers a new way to research the human body heat and comfortability is feasible.

Keywords: human body heat; STAR-CCM+; third boundary condition; thermal comfort

1前言

建筑空调、列车空调、船舶空调等相关的热舒适性问题一直是大家所关注的焦点。舒适性的提高是从事空调设计的工程师们所期望的,但是在空调工程设计方面却没有较大的发展。一方面,由于空调工程的设计者们把更多的精力放在了系统的安全性和经济性问题上,而对于最终空调形式形成的气流组织对人体舒适性影响的问题却无力顾及;另一方面,舒适性的研究一般采用实验的方法,而在工程设计阶段根本不具备实验的条件,如果能用模拟的方法加以解决则是一个不错的想法,但这样的数值模拟本身又面临着诸多困难:第一,在人体散热量的计算方面还不能够十分准确,散热的多少是与人体的冷暖感受相关联的,人体不能再只是简单地当成热源来考虑,同时它还是这种感受的载体,因此模拟时要能够

反映人体感受周围流场的特点，如果散热量的计算误差偏大则必然会影响舒适性分析的结果；第二，要建立更加逼真的人体物理模型才有可能更真实地表达各部位的舒适性感受，在以往涉及到有关人体的数值模拟中，常常把人体简化成为圆柱体或者方体或者它们的组合，虽然这种严重的简化对整体所研究的流场问题影响不大，但在研究人体舒适性问题显然是不合适的！然而建立一个这样仿真的人体模型需要花大量的时间来进行前期的建模并且也加重了离散网格划分的负担，常常会因为网格处理不当而造成模拟的失败；最后，人体散热的边界条件是十分复杂的，它不再是一成不变的定值而是随周围流场的参数变化而变化的，如何将这些参数的复杂变化在离散方程迭代计算时达到很好地控制，这在模拟技术上是存在一定难度的。故此本文试图克服以上所述困难，从第三类边界条件入手结合STAR-CCM+方面的场函数使其具有自适应性来展开对人体舒适性方面的研究，并且在相同工况下和第一类、第二类边界条件进行对比，指出不同边界条件在模拟该问题上的差异。

2 人体模型与网格划分

人体各部分比例按GB-10000-88中国成年人人体尺寸中18~60岁男子、百分位数为90的列表中的数据进行设计，多处采用曲面建模的方法使其更形象逼真，更贴近真实人体。STAR-CCM+独有的包面技术使解决复杂曲面的划分变得十分的容易，选用Trimmer网格类型可以很好地切合物理曲面边界而在主流区域形成结构型网格，用Prism网格类型对人体周围的体网格做2层边界层网格，在曲率变化大的地方及人体周围的区域进行体网格的加密。如果各比例因子选用得当，则网格质量可以得到很好的控制。

图1展示了将要模拟的物理模型，在尺寸为 $2600\text{mm} \times 2200\text{mm} \times 2700\text{mm}$ 物理空间的中央站立一人，空间两侧的上方和下方分别布有相同尺寸 $440\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的送风口和排风口，当具有恒定参数的空气送入后，空气与人体便会发生热交换。图2给出了整体网格的划分情况，可以看出在人体周围的网格要比其他地方密地多，取如图截面为分析截面。图3为人体网格的局部放大图，可看见随人体轮廓变化但距壁面有恒定距离的边界层网格和所划分的人体网格的概况。

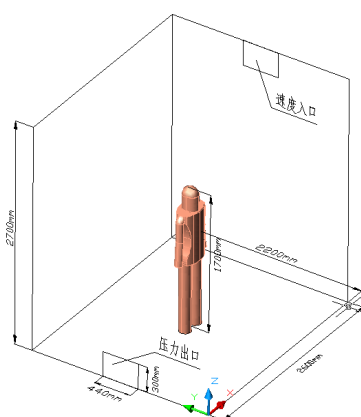


图1物理模型示意图

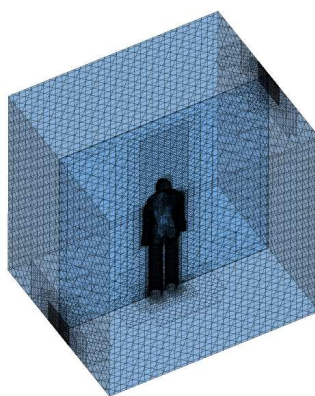


图2模型网格示意图

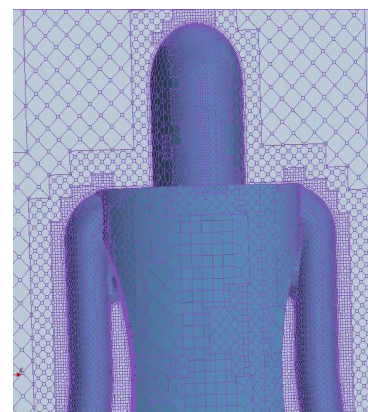


图3人体网格局部放大示意图

3 耦合散热的数学描述

人体与周围环境换热量的计算式为^[1]:

$$L = 0.0014M(34 - T_a) \quad (1)$$

$$E_{res} = 1.72 \times 10^{-5} M(5867 - P_a) \quad (2)$$

$$E_{sk} = E_{diff} + E_{sw} \quad (3)$$

$$E_{sw} = W_{sw} \times E_{max} \quad (4)$$

$$E_{diff} = (1 - W_{sw}) \times 0.06 \times E_{max} \quad (5)$$

$$E_{max} = 0.0165 \times h_c \times (P_{SAT} - P_a) \times [1 / (1 + 0.344 \times h_c \times clo)] \quad (6)$$

$$R = 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] \quad (7)$$

$$C = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \quad (8)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.05 + 0.645 I_{cl} & (I_{cl} \geq 0.078) \\ 1.00 + 1.290 I_{cl} & (I_{cl} < 0.078) \end{cases} \quad (9)$$

$$I_{cl} = 0.155 \cdot clo \quad (10)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} & (2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} \geq 12.1\sqrt{u_i}) \\ 12.1\sqrt{u_i} & (2.38(T_{cl} - T_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{u_i}) \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{sat} = \exp[(-6096.9385)T^{-1} + 21.2409642 + (-2.711193e - 2)T + (1.673952e - 5)T^2 + 2.433502 \ln(T)] \quad (12)$$

$$P_a = RH \cdot P_{sat} \quad (13)$$

$$q = E_{sk} + L + E_{res} + R + C \quad (14)$$

$$h_{jelon} = \frac{q}{T_{cl} - T_a} \quad (15)$$

M —— 是新陈代谢量 (W/m^2)

L —— 呼吸时的显热传热量 (W/m^2)

E_{res} —— 呼吸中的潜热传热量 (W/m^2)

E_{sk} —— 皮肤蒸发散热量 (W/m^2)

E_{sw} —— 皮肤出汗的蒸发散热 (W/m^2)

E_{diff} —— 水蒸汽由压差引起的蒸发散热 (W/m^2)

E_{max} —— 皮肤蒸发潜热最大值 (W/m^2)

W_{sw} —— 出汗面积与总皮肤的面积之比

W —— 人体输出功 (W/m^2)

u_i —— 近壁的空气速度 (m/s)

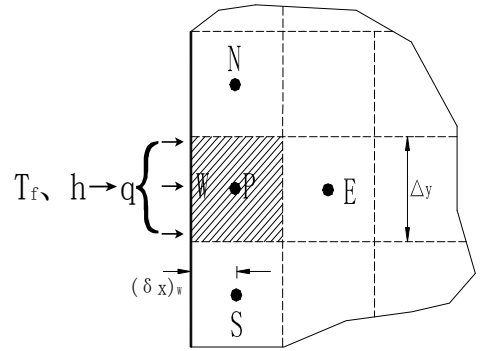
T_{cl} —— 体表温度, 可做为皮肤温度, 也可视为衣服温度 ($^{\circ}C$)

T_a —— 空气温度 ($^{\circ}C$)

T_r —— 平均辐射温度 ($^{\circ}C$)

T —— 当地的空气温度 (k)

P_a —— 水蒸气分压力 (Pa)



- P_{sat} ——饱和水蒸汽分压力 (Pa)
 RH ——相对湿度 %
 h_c ——体表与空气之间的对流换热系数 ($W/m^2 \cdot K$)
 f_{cl} ——着衣体表面与裸体表面之比
 clo ——衣服热阻数 ($m^2 \cdot K/W$)
 I_{cl} ——衣服的热阻 ($m^2 \cdot K/W$)
 h_{je1on} ——折合的等效传热系数 ($W/m^2 \cdot K$)
 q ——热流密度 (W/m^2)

4 人体壁面处网格的数学模型

人体散热问题，其计算域是在人体的外围，是网格内部流场与边界相互作用然后再影响其内部的问题。以二维稳态离散方程为例，计算域外围有流体流过，对 P 点所在的控制容积建立其离散方程：

$$a_p T_p = a_E T_E + a_w T_w + a_N T_N + a_s T_s + b \quad (16)$$

为了处理未知的边界温度 T_w ，在方程两边同时减去 $a_w T_p$

即：

$$a_p' T_p = a_E T_E + a_N T_N + a_s T_s + q \Delta y + b \quad (17)$$

其中：

$$a_w (T_w - T_p) = q \Delta y, \quad b = S_c \Delta x \Delta y, \quad a_p' = a_p - a_w = a_E + a_N + a_s - S_p \Delta x \Delta y$$

由牛顿冷却公式得：

$$q = h(T_f - T_w) \quad (18)$$

由 Fourier 定律可得：

$$q = \frac{k_{eff} (T_w - T_p)}{(\delta x)_w} \quad (19)$$

$$q = \frac{k_{eff} (T_w - T_p)}{(\delta x)_w} = \frac{T_f - T_w}{1/h} = \frac{T_f - T_p}{1/h + 1/h_{local}} \quad (20)$$

将式 (20) 代入式 (17) 中，便可得：

$$(a_E + a_N + a_s - S_p \Delta x \Delta y + \frac{\Delta y}{1/h + 1/h_{local}}) T_p = a_E T_E + a_N T_N + a_s T_s + \frac{T_f}{1/h + 1/h_{local}} \Delta y + S_c \Delta x \Delta y \quad (21)$$

T_w ——壁面温度

h ——对流换热系数

T_f ——计算域边界外的主流温度

k_{eff} ——界面处等效热导率

S_c 、 S_p ——源项构成项

$h_{local} = \frac{k_{eff}}{(\delta x)_w}$ ——当地综合传热系数，软件中会自动根据壁面流场条件进行计算，此值的计算与所选用的

壁函数、近壁流体的热属性、壁面距单元核心的距离，湍流的情况等有关^[2]。

通过以上方法，绕过求解未知量 T_w 、 a_w 从而构建附加的源项便把第三类边界条件产生的热流量由计算域外围引入到了计算域内。此方法还可以用来处理不规则的计算区域，处理导热、对流等耦合问题，实施起来比较简单并且计算高效^[3]。

输入 h 与 T_f 以及流场初始化后, 通过 (20) 式可以算得 q , 改变 T_w 使 $T_w = q / h_{local} + T_p$ 可使当前 q 由壁面引入, 热量引入以及内部流场共同作用又会改变 T_p , 这就是第三类边界条件热量和壁温的计算方法。

当 $q > 0$ 时, 由 $q = h(T_f - T_w)$ 可以看出 T_w 是存在上限 T_f 的, 第三类边界条件给定的主流温度无非是网格边界外部的一个恒定不变的温度值 T_f , 而只不过是该值被惯性性地认为只能是流体罢了, 虽然人体内部不是流体, 但却能提供这个所谓“流体”的不变温度, 因此可以巧妙地以人体固体体温做为该边界条件; T_p 是由壁面热流传递与空气流场共同作用而决定的, 是人体与空气的相互作用, 即为 T_{cl} 。皮肤位于身体的体表, 散热条件良好, 因此波动范围较大, 一般在 $20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 之间^[4]。一些生理反应与主观感觉如表1所示, 可以说皮肤温度是综合反映人的冷、热和舒适性等感受的体现!

表 1 不同皮肤温度下的主观感觉

皮肤表面温度 ($^\circ\text{C}$)	主观感觉
29~31	不活动时感到寒冷
31~33	温度温和
33~34	温度适中有舒适感
35~39	感到热
39~41	过性痛阈
41~43	灼烧痛阈

采用第二类边界条件, 就失去了参考温度 T_f , h_{local} 迭代计算变化及边界其它地方热量传递等因素, 常会引起 T_w 和 T_a 同时上涨, 而无法控制, 虽然对流域散入的热量是恒定的, 但结果常会超过正常体温, 不符合实际情况。

5 数值计算模型与边界条件的设定

采用 Realizable $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型, 并开启水蒸汽的能量与组分方程, 对整个计算域建立方程组如下:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, i=1,2,3 \quad (22)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(u + \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \rho \kappa \right) + \rho \beta g_i (T_{ref} - T) \quad (23)$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{p_r} + \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon \cdot \sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \quad (24)$$

$$\text{组分方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{\sigma_c} + \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon \cdot \sigma_t} \right) \frac{\partial C}{\partial x_i} \right] \quad (25)$$

$$\text{湍流平均动能 } k \text{ 方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon \cdot \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (26)$$

$$\text{湍流动能耗散 } \varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{c_u \rho k^2}{\varepsilon \cdot \sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 E_{ij} \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (27)$$

其中:

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.2, \quad C_2 = 1.9, \quad \sigma_t = 1.0, \quad \sigma_c = 1.0$$

$$C_1 = \max(0.43 \frac{\eta}{\eta + 5})$$

$$\eta = (2E_{ij} E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$C_u = \frac{1}{A_0 + A_3 U^* k / \varepsilon}$$

$$A_0 = 4.0$$

$$A_3 = \sqrt{6} \cos \phi$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W)$$

$$W = \frac{E_{ij} E_{jk} E_{kj}}{(E_{ij} E_{ij})^{1/2}}$$

$$U^* = \sqrt{E_{ij} E_{ij} + \bar{\Omega}_{ij} \bar{\Omega}_{ij}}$$

$$\bar{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$$

当空气的物性参数确定以后，三个方向的速度分量、压力、温度、体积浓度、 k 和 ε 等变量与连续性方程、三个动量方程、能量方程、 k 方程和 ε 方程形成 8 个方程 8 个未知量的封闭方程组，方程组可解。

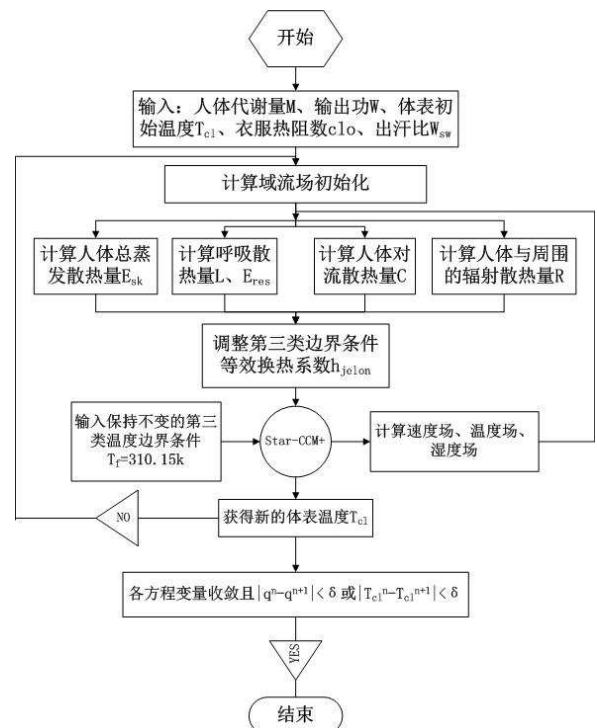
取送风口水蒸汽相对湿度 60%，21℃，风速 2m/s，沿正下方 45 度送入， $M=100.4 \text{ (W/m}^2\text{)}$ ， $W=0 \text{ (W/m}^2\text{)}$ ， $\text{clo}=0.5$ ， $W_{sw}=0.1$ ， g_i 沿 z 方向为 -9.81m/s^2 ，壁面无滑移，周围壁面为绝热，采用分离式求解器，离散精度为二阶。

6 计算程序流程设计

计算流程如右图所示，此计算方法主要是根据环境因素计算出人体各节点的总散热量，然后折算出当前的换热系数值，赋给 STAR-CCM+ 计算模块。可取体表的平均温度或该温度计算的热流量做为监测值，将每个壁面结点换热后的壁面温度值代入计算下次散热量。如果当前壁温过大则散热量计算过大，则空间内温度就会升高，温差变小，下次散热计算量变小，下次壁温计算值就会变小，反之亦然！当各变量收敛后，监测温度值百分位不再发生较大波动时可终止计算。

5 人体耦合散热计算流程

边界层担负着壁面传热计算的重要角色，具有热阻，其网格之间会有热量的传递，像皮肤层一样具有调节能力。理想情况是希望所要计算的每一节点 p 可以按照自身情况散出当前环境下应该散出的热量，但按此思路编程后会发现，其该节点 p 处边界层的热阻往往并不能顺利导出该热量，从而导致该节点 p 以及所对应的节点 W 温度升高，温度升高后，计算所需的散热量升高，从而又会使该节点 p 温度升高，如此反复，直到该节点 p 所对应的节点 W 温度与 T_f 相同后便再无法散出热量；此外，要求体表各 p 点散出各自计算的散热量其本身做法就不合理，因为边界层网格之间会发生热量传递，点 W 的热量是无法保证全从 p 点散出的。因此，可按各节点 p 计算所需的散热量平均赋给边界 W ，边界层可按当前状况选择合理的地方将其散出，这样便完成了所需热量如何传递到计算域的过程并且保证了散热量的准确性。



壁面函数中的无量纲距离 y^+ 是模拟成败的关键! 本例采用高 Re 壁面函数法, 边界层网格应处于壁面区的粘性底层, 即 $y^+ < 5$, 可通过初算后调整边界层网格厚度来满足要求, 本例边界层厚度为 0.075mm , $y^+ < 1$ 。

辐射散热量计算中 T_r 取周围壁面网格核心温度值的平均值; 对流散热量中 T_a 取空间体平均温度值, u_i 取 p 点的速度; 蒸发散热量计算中各变量也均取 p 点值。这一切复杂的计算流程在 STAR-CCM+ 中可以用 Field Function 轻松实现, 这充分体现了该软件的强大之处。

7 结果分析

7.1 第一类边界条件结果分析

取人体壁温 37°C , 图 4 展示了达到稳态时的断面速度矢量图。从图中可以看出, 人体各部位周围的空气速度不尽相同, 肩膀迎风面风速最高, 约为 1.3m/s , 头部风速约为 0.31m/s , 左腋下的空气流速为 1.2m/s , 两腿间的空气流速为 0.8m/s , 分布情况与第二、三类边界条件下所模拟的结果基本一致。 q 平均值为 180.01W/m^2 , 其值在 0 与 718.64 之间, 失真严重。图 5 展示了人体各部位热流密度的分布情况, 各部位散热量的区别明显, 但整体散热量偏高。此边界条件无法给出温度分布, 其壁面传热的由壁面函数来承担, 没有相应的算法加以控制, 所以很难正确反映传热量, 由于第一类边界条件设壁面恒温, 因此无法反映体表温度分布。

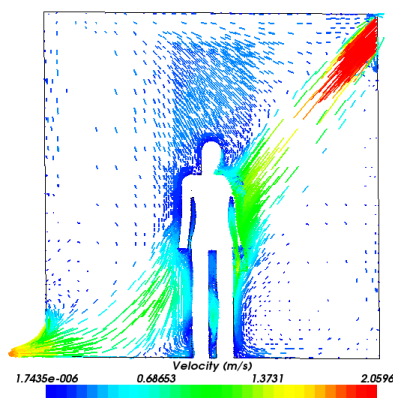


图 4 速度矢量图

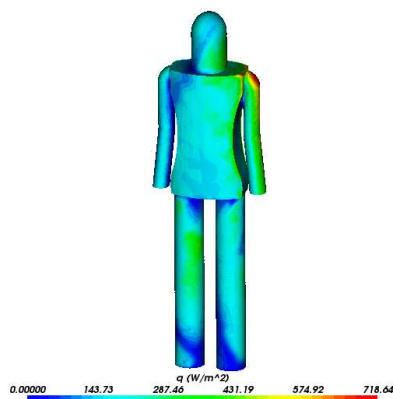


图 5 第一类边界条件 q 分布图

7.2 第二类边界条件结果分析

人体壁面的热流密度取第三类边界条件模拟得到的平均值 131.25W/m^2 , 经模拟后人体体表平均温度为 36.52°C , 其值在 24°C 到 600°C 之间, 失真严重。图 6 展示了人体各部位温度的分布情况, 脖子、腋下、腿部等多处可明显看出已经超过了 50°C , 由此可见, 同等散热量下模拟后所反映的体表温度是有问题的, 而这是与事实不符的!

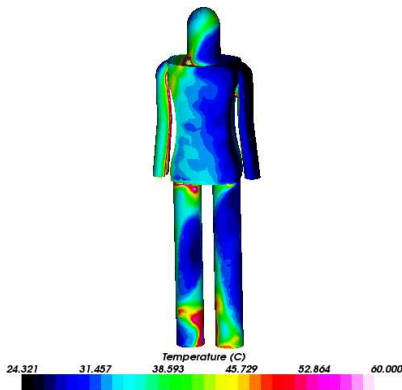


图 6 第二类边界条件 T_{cl} 分布图

7.3 第三类边界条件结果分析

人体 q 平均值为 $131.25 W/m^2$ ，其中 R 为 $46.18 W/m^2$ ， E_{sk} 为 $21.70 W/m^2$ ， C 为 $54.12 W/m^2$ ， h_c 为 $5.24 W/m^2 \cdot K$ ， L 为 $1.72 W/m^2$ ， E_{res} 为 $7.55 W/m^2$ 可见辐射与对流传热量占了很大的比重。体表温度在 $24^\circ C$ 至 $37^\circ C$ 之间，平均温度为 $31.61^\circ C$ 。脖子、腿的背风处 $36^\circ C$ 、右腋下 $37^\circ C$ 感到热；而左臂由于长期受迎风作用温度约 $26^\circ C$ 左右，比较寒冷；其它大部分区域在 $30.1^\circ C$ 至 $34.5^\circ C$ 之间，比较舒适。迎风处 h_c 最大为 11.2，背风处为 3.69， C 值大部分在 30 至 50 之间，右腋下 h_c 值虽小但由于温差大的原因使 C 值较高，在 60 至 80 之间；其 E_{sk} 值 R 值也明显高于其它部位。各项参数按文献^[5]提供的数据来看，是具有合理性的，可见用 STAR-CCM+ 软件模拟的结果是非常出色的！

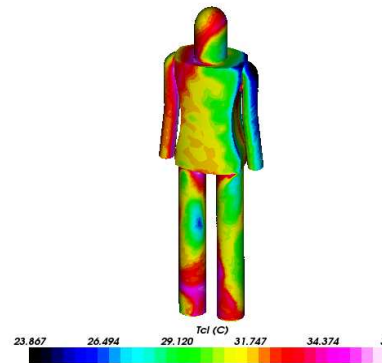


图 7 第三类边界条件 T_{cl} 分布图

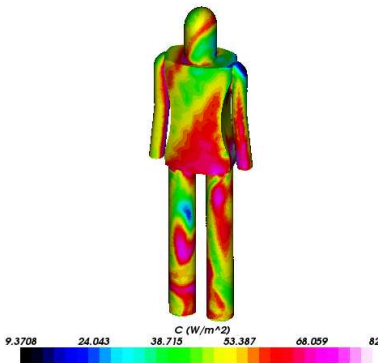


图 8 第三类边界条件 C 分布图

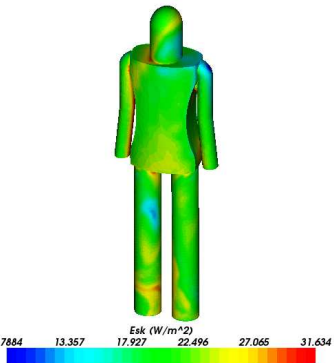


图 9 第三类边界条件 E_{sk} 分布图

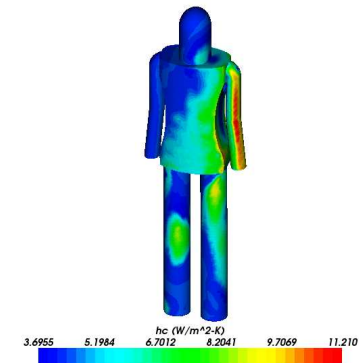


图 10 第三类边界条件 h_c 分布图

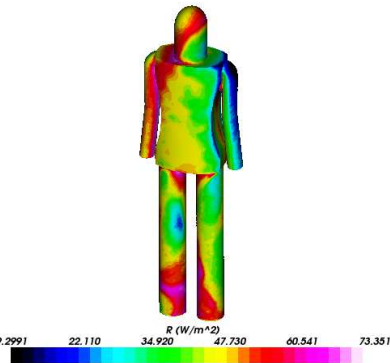


图 11 第三类边界条件 R 分布图

需要补充说明几点：经实践验证，调节边界层厚度使其 y^+ 值在小于 5 的范围内不等，结果发现对计算结果有着十分大的影响， y^+ 偏大会造成平衡后体表平均温度的下降，本例中当 y^+ 为 2.5 时，体表平均温度为 26℃，原因主要发生在计算辐射散热量方面，如果工程应用时并不考虑辐射散热，则可忽略 y^+ 在 5 以内不同所造成的影响。人体皮肤的辐射温度在 27℃至 28℃之间^[5]，可对模拟时体表是皮肤还是衣服外表有参考作用。另外，当 E_{sk} 用方程(28)计算

$$E_{sk} = 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - Pa] + 0.42(M - W - 58.15) \quad (28)$$

模拟时会发现等于加入了人体内部的调节系统，因为方程式其本身就是为了满足热舒适性的，这样以来，模拟得到的散热量就是初始设置的定值 $M - W$ ，不能模拟任意环境下的任意散热量了，但这样可以摆脱 y^+ 值的影响，可以得到硬要满足热舒适条件时的体表温度分布和种种其它散热量的分布。因此，在引用本文方法解决实际工程问题时，要按模拟的目的是为了研究人对环境的影响还是为了研究环境对人的影响来进行上述方程的选择！

7.4 人体散热对周围空气的影响

因为三种边界条件在局部刻画散热量方面是存在差异的，所以这种差异必然会给周围空气带来不同的影响，为了得到较好的对比效果，统一用相同的色系和温度范围来描述截面人体周围的空气温度分布。

第一类边界条件所产生的热气流沿围护结构从两则上升，对温度、湿度分布的影响要大于第三类边界条件。送风口的下侧空气升温、湿度下降，这是由于腿部对来流空气恒定加温所引起的，然而实际人体对来流的作用并没有这么强，这是由于前两者在边界条件方面没有调节能力所致，第二类边界条件右腋下温度超过了 80℃，相对湿度也因为高温而变的极低，两退间局部温度过高。相比之下，本例的模拟结果却不存在这些问题。建筑空调设计中室内温差要小于 3℃，当所要模拟的人数过多时，这种影响可能会带来更大的误差。

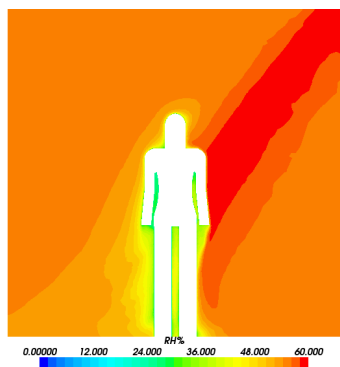


图 12 第一类边界条件 RH 分布图

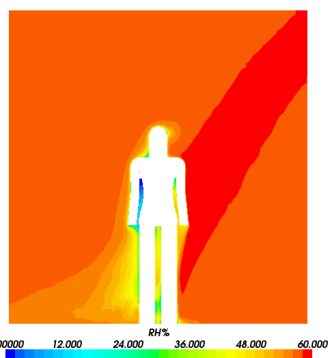


图 13 第二类边界条件 RH 分布图

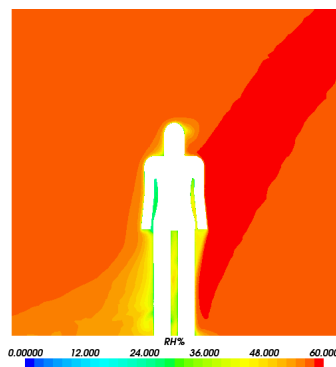


图 14 第三类边界条件 RH 分布图

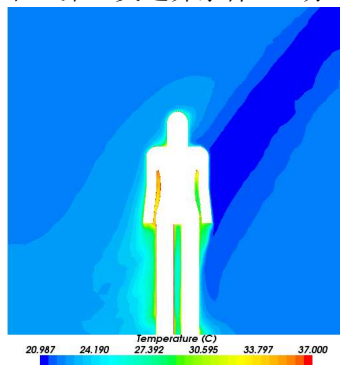


图 15 第一类边界条件 T_a 分布图

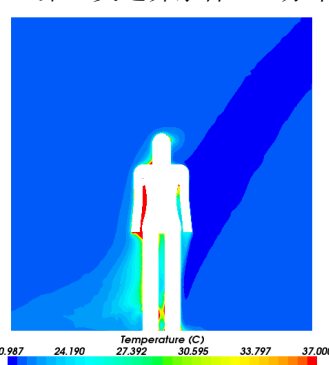


图 16 第二类边界条件 T_a 分布图

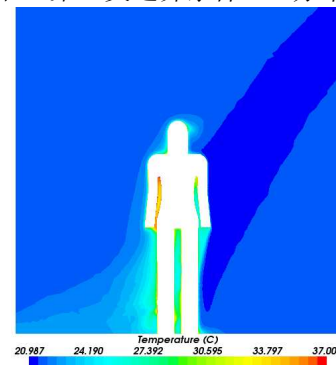


图 17 第三类边界条件 T_a 分布图

8 结束语

单纯从热源的角度来看,第二类边界条件要优于第一类边界条件,因为皮肤具有较大温度波动,盲目地将整个壁面视为恒温去加热空气其做法本身就有些不合理,虽然可以近似这样考虑但有可能导致散热量计算的严重不符。第二类边界条件可以保证散热量,但在反映体表温度时存在较大的误差,甚至出现错误,背风侧不可能散出与迎风侧一样的热量,但是却按相同的热量进行了计算,这是不合理的;而在模拟之初给定具体值时常常又是一个让人头疼的问题,因为可能无法估计散热量的大小。散热量的计算是研究舒适性问题以及对周围流体影响的关键,而上述两种边界条件在解决此问题上都存在自身的缺陷,因为它们无法反映空气对流与汗液蒸发等相关问题。与其相比,本文所采用的方法可以综合反映与周围流场的相互影响,如果这种影响可以用数学很精准地描述,那么散热量的计算就会是准确的,从而可以更好地反映各部位的冷热感觉,进而做为一种判断是否舒适的依据。本文整套的计算方法对数学方程依赖性很强,在散热方面只是对流场的硬性反映,皮肤部分的体表温度本身还不具备神经调节的作用,如果能加上体心对皮肤温度的调节程序与之配合会更好。此外,对多人模拟时还可按每个人能量代谢、出汗率、做功的不同进行程序参数的分别调节,对每个人自身壁面也还可以根据衣物和皮肤的区别建模时进行分区和单独设置。

本文从数学理论、人体建模、网格划分、第三类边界条件应用的巧妙处理、STAR-CCM+场函数、模拟结果的分析比较等多方面结合的角度进行了人体热舒适性方面的研究,为解决涉及人体热源的工程问题奠定了基础。

9 参考文献:

- [1] Fanger, Melikov a K.Trubulence and draft[J].ASHARE Journal, 1989, 31:18-23
- [2] STAR-CCM+ User' s Guide.Field Function Reference,1715.
- [3] 陶文铨.数值传热学[M].西安:交通大学出版社,2001: 99.
- [4] 潘信峰.重庆市室内热环境下人体生理和热舒适的实验比较研究[D].重庆:重庆大学,2007: 18, 31.
- [5] 村上周三.CFD与建筑环境设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2007: 119, 127-128.