

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.017



辐射空调房间人体与环境表面角系数的数值模拟求解

胡健, 李念平, 黄立志, 郑德晓
(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:精确求解人体与环境表面间的角系数是研究辐射空调房间内人体辐射散热与热舒适的基本前提。结合角系数与有效辐射面积的离散公式,推导出人体与环境表面辐射角系数的数值模拟结果修正式,得到了中国人三维坐姿人体模型。在分别对坐姿人体与顶板、壁面、地板间的角系数模拟求解后发现,坐姿人体前后具有较大的方向性,人体对前方环境表面的角系数大于人体对后方环境表面的角系数。将角系数的数值模拟解与半解析解进行比较,对于顶板与垂直壁面,半解析解与模拟解较为吻合;对于地板,半解析解与模拟解存在较大的误差,并对半解析解进行了相应的修正。

关键词:辐射传热;角系数;三维坐姿人体模型;数值模拟

中图分类号:TU831 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)01-0122-07

Numerical calculation of angle factor between human body and environmental surfaces in radiant air-conditioning rooms

Hu Jian, Li Nianping, Huang Lizhi, Zheng Dexiao

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: The study of human body's radiation heat loss and thermal comfort need to calculate the angle factor between the human body and the envelope surfaces. Firstly, the paper derived the mathematical equation to revise the result of numerical calculation of angle factor based on the discrete formula of the angle factor and the effective radiation area, and established the standard three-dimensional body model of Chinese human in sitting posture. Then, the paper calculated the angle factor between the human body and roof, wall, floor, respectively, and found that the angle factor between the human body and the front surface is greater than the rear surface. Compared numerical calculation of angle factor with semi-analytical calculation, it is found that there are good agreements between semi-analytical calculation and numerical calculation for the roof and vertical wall, but there is a larger error for the floor, and the paper has modified these errors.

Keywords: Radiant heat transfer; angle factor; human body model in sitting posture; numerical calculation

收稿日期:2017-05-06

基金项目:国家自然科学基金(51578220)

作者简介:胡健(1991-),男,主要从事辐射空调方式研究,E-mail:hjhvac@126.com。

李念平(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:linianping@126.com。

Received:2017-05-06

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51578220)

Author brief:Hu Jian (1991-), main research interest: radiant air conditioning system, E-mail:hjhvac@126.com.

Li Nianping (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail:linianping@126.com.

采用辐射空调系统的房间,辐射换热成为人体散热的主要方式,精确求解人体与环境表面间的角系数是研究人体热舒适及辐射散热的重要前提^[1]。针对人体与环境表面间角系数的求解,目前,有理论计算^[2-5]、实验测量^[6-10]以及数值模拟^[11-13]3种方法。实验测量方法中,典型的是 Fanger 采用摄像法^[6]测量人体在不同方位的有效投影面积从而间接计算获得的人体与环境表面的角系数^[7],其测量时设定的光学距离为 7 m;实验测量的不足是难以获得通用的角系数计算公式且测量成本较高,当人体与环境表面的实际距离不等于 7 m 及查表时会产生额外的误差。数值模拟方法中,比较典型的是 Yoshiichi Ozeki 等人模拟得到的人体与矩形表面间的角系数^[11],其主要是对 Fanger 采用摄像法获得的角系数进行验证,其设定人体与环境表面的距离也是 7 m;模拟发现,对于地板,Fanger 的结论与模拟结论有较大的误差。在理论求解角系数方面,文献[2]将坐姿人体简化为一个长宽高分别为 0.28 m×0.28 m×1.2 m 的六面体,利用周线积分法求得了人体与各种环境表面的角系数计算公式(公式形式是一项或两项二重积分),认为人体在室内没有固定的朝向,进而忽略了人体前后左右的方向性。文献[2]把人体简化为简单的固体,获得人体对环境表面二重积分形式的角系数公式,实质上是一种半解析的计算方法。通过数值模拟方法研究人体对不同朝向环境表面角系数特征,并对比分析文献[2]提出的半解析方法角系数结论的适用性,并对其进行适当的修正。

1 角系数的计算方法

1.1 角系数的数学模型

根据角系数的基本定义以及数值模拟离散化的特点,人体对环境表面的角系数可表述为^[14]

$$F'_{A_p-A_k} = \frac{1}{A_p} \int_{A_p} \int_{A_k} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} \delta_{ij} dA_{p_i} dA_{k_j} \quad (1)$$

式中: $F'_{A_p-A_k}$ 为人体 A_p 对(第 k 个)环境表面 A_k 的模拟角系数; A_p 为人的外表面积, m^2 ; r 为 A_p 面上的微元面 dA_{p_i} 与 A_k 面上的微元面 dA_{k_j} 连线的距离, m ; θ_i 、 θ_j 分别为微元面 dA_{p_i} 、微元面 dA_{k_j} 的法线与连线 r 之间的夹角; δ_{ij} 为由微元面 dA_{p_i} 与 dA_{k_j} 之间的可见性确定,两者相互可见时 $\delta_{ij} = 1$ (即没有其它面的遮挡),否则, $\delta_{ij} = 0$ 。

数值模拟求解人体与环境表面间的角系数时,由于人体自身的相互遮挡,人体表面的单元网格面

之间必然存在相互可见的情况,根据式(1)可知部分单元网格面间的角系数不等于 0。因此,数值模拟的结果是人体对自身的角系数大于 0,以及人体对环境表面的角系数之和小于 1。

但是,理论上求解人体与环境表面的辐射换热时,是根据平均辐射温度与有效辐射面积的概念进行计算的。根据有效辐射面积,人体与某环境表面之间的角系数为^[11]

$$F_{P-A_k} = \sum_i \sum_j A_{P_i} F_{ij} / A_{\text{eff}} \quad (2)$$

式中: F_{P-A_k} 为人体 A_p 对(第 k 个)环境表面 A_k 的实际角系数; F_{ij} 为人体 A_p 第 i 个微元面 dA_{p_i} 对 A_k 面上的第 j 个微元面 dA_{k_j} 的角系数; A_{p_i} 为 A_p 面上的第 i 个微元面的面积, m^2 ; A_{eff} 为人体有效辐射面积, m^2 。人体的有效辐射面积离散化求解公式为^[15-16]

$$A_{\text{eff}} = \sum_k \sum_i \sum_j A_{p_i} F_{ij} \quad (3)$$

将式(2)化成微积分的形式为

$$F_{P-A_k} = \frac{1}{A_{\text{eff}}} \int_{A_p} \int_{A_k} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} \delta_{ij} dA_{p_i} dA_{k_j} \quad (4)$$

对比式(1)与式(4),可知

$$F_{P-A_k} = \frac{A_p}{A_{\text{eff}}} F'_{A_p-A_k} = \frac{1}{f_{\text{eff}}} F'_{P-A_k} \quad (5)$$

则人体的有效辐射面积为

$$A_{\text{eff}} = A_p \sum_k F'_{P-A_k} = A_p (1 - F'_{P-P}) \quad (6)$$

有效辐射面积系数为

$$f_{\text{eff}} = \frac{A_{\text{eff}}}{A_p} = \sum_k F'_{P-A_k} = 1 - F'_{P-P} \quad (7)$$

式中: F'_{P-P} 为数值模拟下,人体面对自身的角系数; f_{eff} 为人体有效辐射面积系数, m^2 。

人体的有效辐射面积系数等于人体对周围环境表面角系数数值模拟值之和,对于确定的形态,有效辐射面积系数为一定值。数值模拟下人体对环境表面的角系数需要式(5)、式(7)进行修正。

1.2 Fluent 中角系数的计算方法

Fluent 中提供了如下几种辐射换热模型:离散换热辐射模型(DTRM)、Rosseland 辐射模型、P-1 辐射模型、离散坐标(DO)辐射模型和表面辐射模型(S2S)。其中表面辐射模型(S2S)是基于角系数求解的辐射换热模拟方法。

在采用表面辐射模型求解辐射换热前,需要计算物理模型中各表面间的角系数。Fluent 提供了两种角系数的数值计算方法:单位球法和自适应方法。单位球法也叫半球方法(Hemicube),适用于三维模

型情况下角系数求解。

单位球法是利用面积的积分方法,在逐行的基础上计算角系数。再对微元面计算的角系数求和就得到了整个表面的角系数,而自适应计算方法是基于面对面,计算过程中可根据面之间的接近程度使用不同的代数方法。对于简单几何体,自适应方法的计算速度较快;而对于大型复杂几何体,采用单位球法比自适应方法的计算速度要快。

单位球法基于表面几何特性的 3 个假设:重叠性、可视性和接近性。在 Fluent 中,用户可以通过设置 3 个与之关联的参数来提高角系数的计算精度。在多数情况下,缺省的设置已经可以满足计算精度要求,故采用单位球法进行角系数计算。

2 坐姿人体模型与参数分析

2.1 坐姿三维人体模型

数值模拟求解人体与环境表面的角系数,关键在于建立恰当适宜的人体模型。研究表明,人体的生理特征决定了人体的各部分指标并非完全相互独立,而是存在很强的相关性^[17]。呼慧敏等^[18]以中国标准化研究院 2009 年采集的 3 000 多位中国成年人人体数据为依据,对人体的各部分之间存在的相关系数进行了研究,马广韬等^[19]对于坐卧状态下的人体静态尺寸也进行了测量与分析。根据以上研究,建立了如图 1 所示的坐姿人体三维模型。

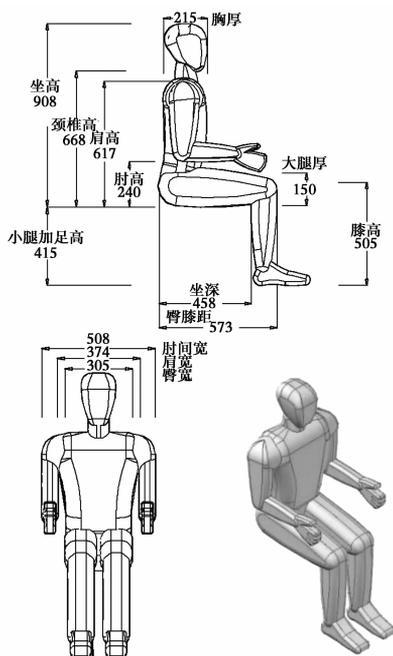


图 1 三维坐姿人体模型图示

Fig. 1 The human body model in sitting posture

2.2 坐姿人体模型分析与网格划分

三维人体模型的外表面积为 1.73 m^2 ,有效辐射面积系数为 0.78,有效辐射面积为 1.35 m^2 。实际坐立姿态人体的有效辐射面积系数为 0.7 左右^[20],可见模型的有效辐射面积系数偏大。模型尽量客观地反映了坐姿人体肢体之间的相互遮挡,但为了方便起见,模型表面均简化为光滑的曲面。虽然,模型不能真实反映人体表面的凹凸不平,但肢体之间的相互遮挡对角系数的影响远大于表面的不平。这主要由两个原因导致:一是服装表面的凹凸不平在全身的分布比较均匀,其影响的主要是人体的有效辐射面积。其次,根据式(5),有效辐射面积系数偏大(F'_{P-P} 偏小),那么 F'_{P-A_k} 也会偏大,从而人体对环境表面的角系数几乎不变。

人体模型表面统一采用非结构化的三角形网格,主要网格面的大小为 15 mm ,最大网格 20 mm 。本文人体模型参数与其它人体模型参数对比如表 1 所示^[21]。

表 1 坐姿人体模型参数对比

Table 1 Comparison between different human body models in sitting posture

模型	外表面积 A_{cl}/m^2	有效辐射面 积系数 f_{eff}	有效辐射面 积 A_{eff}/m^2	离散 网格数
复杂模型	1.73	0.71	1.22	4 392
本文模型	1.73	0.78	1.35	19 778
简单体组合模型	1.52	0.85	1.29	617
六面体模型	1.47	1.00	1.47	

3 数值模拟结果与分析

3.1 坐姿人体与顶板角系数的数值模拟

将顶板以人体中心正上方为顶点划分为若干矩形,计算中可视为人体位于矩形顶板一个顶点的正下方,以顶板与人体中心(肚脐位置)的垂直距离为 3 m 为例,坐姿人体与其上方前、后侧顶板的角系数数值模拟解如图 2 所示;若认为人体在室内的朝向随机,则可忽略人体前后左右的方向性。角系数数值模拟解的均值与文献[2]的半解析解对比如图 3 所示。图中 X 、 Y 分别为壁面的长宽尺寸。

由图 2 可知,人体对前侧顶板的角系数大于人体对后侧顶板的角系数,并且二者之间的差值随着顶板尺寸的增大而累积增大。这是因为模型中人体的肢体均位于前侧,所以,对于前侧顶板来说,人体

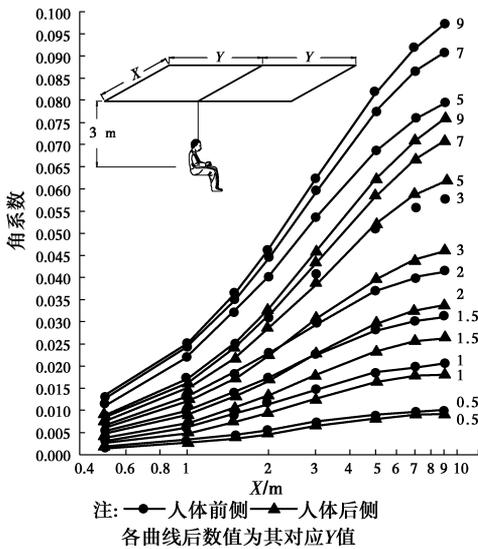


图 2 坐姿人体对顶板的角系数数值模拟解
Fig. 2 Numerical calculation results between a seated person and the ceiling

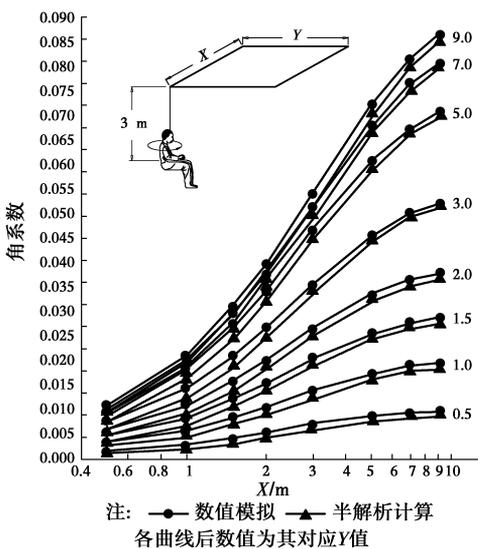
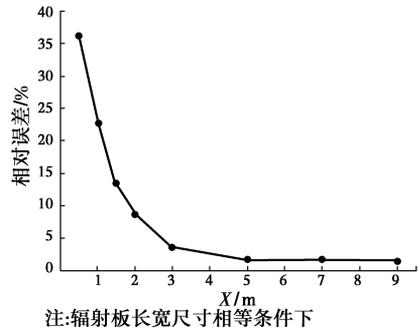


图 3 坐姿人体对顶板的角系数模拟解与半解析解比较
Fig. 3 Semi-analytical and numerical calculation results in ceiling case



注:辐射板长宽尺寸相等条件下

图 4 相对误差分析(人体与顶板)
Fig. 4 Relative error in ceiling case

3.2 坐姿人体与壁面角系数的数值模拟

由于坐姿人体左右对称,故可把垂直壁面分成身体同侧的 4 个壁面进行计算。选取身体左侧的 4 个壁面:前方壁面、左前方壁面、后方壁面、左后方壁面。以人体中心与目标壁面顶点垂直距离 4 m 为例。图 5 为坐姿人体与前方、左前方 4 m 处壁面的角系数模拟值;图 6 为坐姿人体与后方、左后方 4 m 处壁面的角系数模拟值。图中 X、Y 分别为壁面的长宽尺寸。

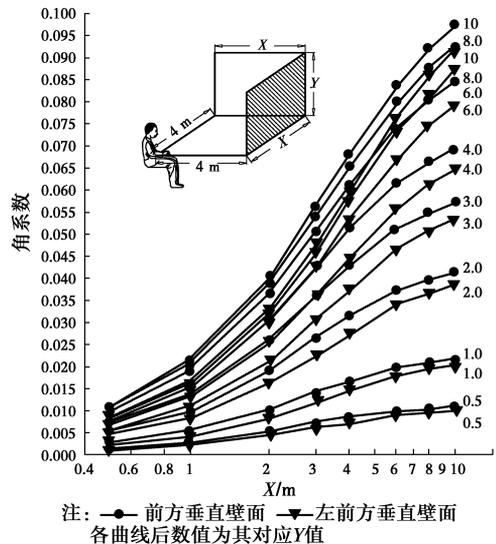


图 5 坐姿人体与前方、左前方 4 m 处壁面的角系数模拟值

Fig. 5 Numerical calculation results between a seated person and the front vertical wall(4 m away)

总体上讲,坐姿人体对 4 个方位垂直壁面的角系数大小排序为:前方壁面>左前方壁面>后方壁面>左后方壁面。人体对后方壁面与左后方壁面的角系数相差很小,一般情况下,左后方壁面角系数稍微大于后方壁面的角系数,但是当壁面边界尺寸较大时,左后方壁面的角系数出现了大于后方壁面角系数的情况。由于人体自遮挡的原因,前方壁面的

各部分之间遮挡较弱。而对于后侧顶板来说,四肢部分被躯干部分遮挡现象明显,所以,人体对前侧顶板的角系数大于对后侧顶板的角系数。由图 3 可知,人体对顶板角系数的半解析计算值略微的小于数值模拟值,二者之间的差值是随着顶板边长的增大而减小的。在顶板边长相等的情况下,二者的相对误差如图 4 所示,可见,相对误差随着顶板边长的增加迅速的降低。顶板边长大于 2 m 时,六面体简化模型的半解析计算解与数值模拟值解之间的误差已经小于 8.6%,顶板边长大于 3 m 时,相对误差小于 3.6%。

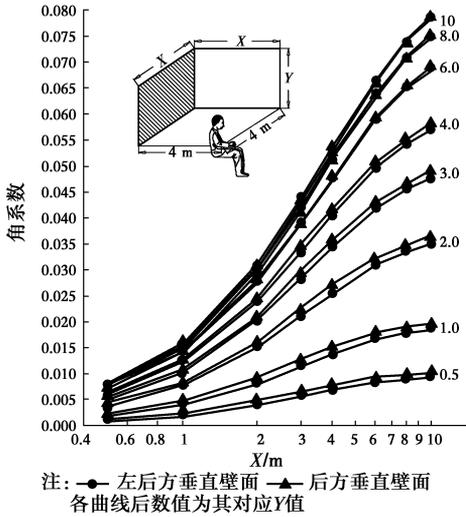


图 6 坐姿人体与后方、左后方 4 m 处壁面的角系数模拟值

Fig. 6 Numerical calculation results between a seated person and the rear vertical wall(4 m away)

板长宽尺寸相等时,该情况下半解析解相对于数值模拟解的相对误差如图 8 所示。即使在壁面边界尺寸很小的情况下,二者的相对误差也小于 10%;在边界尺寸大于 1 m 的时,相对误差小于 2.7%;当边界尺寸等于 4 m 左右时,相对误差接近于 0;二者的相对误差随边长增大而逐渐增大并趋于平稳,但相对误差一直小于 3%。

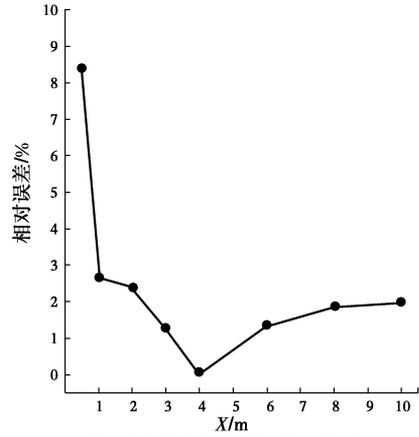


图 8 半解析解与模拟解相对误差分析(壁面)
注:辐射板长宽尺寸相等条件下

Fig. 8 Relative error in vertical wall case

角系数大于左前方角系数,并且前方、左前方两个壁面的角系数明显地大于后方、左后方两个壁面的角系数。若认为坐姿人体在室内的朝向是随机的,那么人体对壁面的角系数等于人体对 4 个方位壁面的角系数的均值,将其与文献^[2]的半解析解对比如图 7 所示。图中 X、Y 分别为壁面的长宽尺寸。

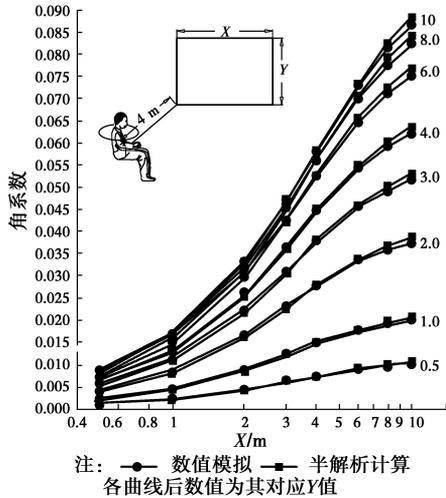


图 7 数值模拟解与半解析解比较(壁面)
Fig. 7 Semi-analytical and numerical calculation results in vertical wall case

3.3 坐姿人体与地板角系数的数值模拟

根据坐姿人体左右方向的对称性,可把水平地板分成前、后侧的两个面,人体面向 Y 方向,身体侧边为 X 方向,人体中心位于地板一顶点的正上方。图 9 为坐姿人体与前、后侧地板角系数的数值模拟解;图 10 为坐姿人体与前后侧地板角系数模拟解的均值与半解析解的比较。

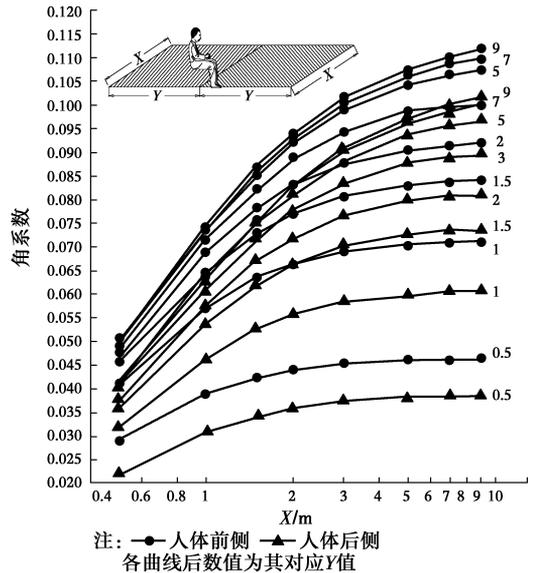


图 9 坐姿人体对地板的角系数数值模拟解
Fig. 9 Numerical calculation results between a seated person and the floor

可见坐姿人体对垂直壁面角系数的半解析解与数值模拟解是非常吻合的,其误差小于对顶板半解析解与数值模拟解间的误差。其中,当壁面边界尺寸较小时,半解析解稍微小于数值模拟解;当壁面边界尺寸较大时,半解析解稍微大于数值模拟解,在壁面边界尺寸合适时,两者的吻合程度极高。当辐射

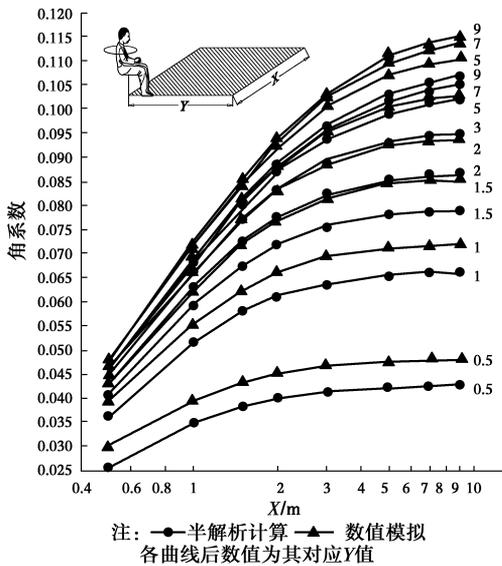


图 10 数值模拟解与半解析解比较(坐姿人体对地板)
 Fig. 10 Semi-analytical and numerical calculation results in floor case

由结果可知,坐姿人体对前侧地板的角系数大于对后侧地板的角系数。当地板边界尺寸很小时(小于 0.5 m),坐姿人体对地板已经有了较大的角系数(超过 0.02),并且前后侧的角系数差值已经非常明显。由图 10 可知,相较于数值模拟解,坐姿人体对地板角系数的半解析解更大。长宽尺寸相等时,二者的相对误差如图 11 所示,边长大于 1 m 时二者之间的相对误差在 7.5%左右。由于人体对地板具有较大的角系数,所以绝对误差较大。

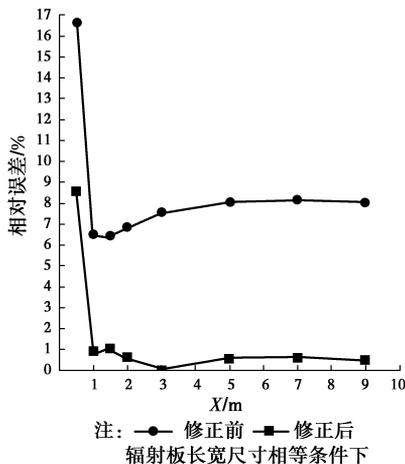


图 11 半解析解与模拟值相对误差分析(地板)
 Fig. 11 Relative error in floor case

在文献[2]中,将坐姿人体对地板角系数的半解析解描述为地板尺寸 X, Y 的函数 $f(X, Y)$ 。由分析结果可知,半解析解与数值模拟解间的相对误差稳定在 7.5%左右,因此,可对半解析解作如下修正

$$F'_{P-floor} = \frac{f(X, Y)}{1.075} \quad (8)$$

半解析解与数值模拟解的相对误差如图 11 所示,将半解析解按式(8)修正后,与数值模拟解的对比如图 12 所示。可知修正后的半解析解在地板边长大于 1 m 时,与模拟解的相对误差小于 1%。

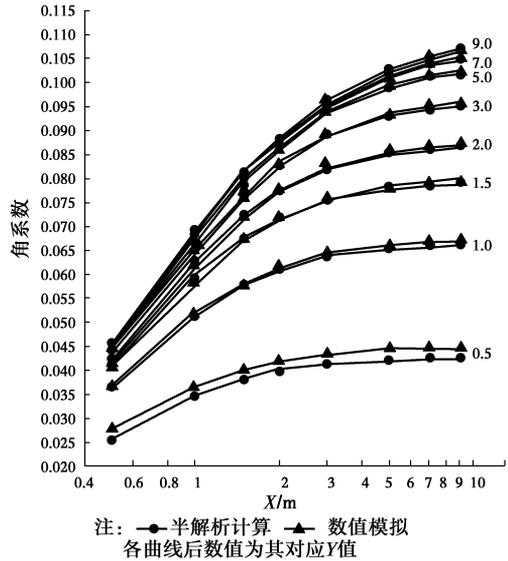


图 12 修正后的半解析解与数值模拟解比较(地板)
 Fig. 12 Semi-analytical and numerical calculation results (after modification) in floor case

4 结论

应用 ANSYS 软件,采用数值模拟方法求解了人体与顶板、壁面、地板等环境表面间的角系数。由于坐姿人体前后不对称,且位于人体前侧的肢体较多,人体对前方环境表面的角系数大于对后方环境表面的角系数。对比角系数的数值模拟解与将人体简化为六面体模型的半解析解发现,对于顶板,角系数的半解析解与数值模拟解一致程度较好,顶板边长大于 2 m 时半解析解与数值模拟解的相对误差小于 8.6%,大于 3 m 时相对误差小于 3.6%,且相对误差随边长的增大而减小。对于垂直壁面,角系数的半解析解与数值模拟解最为接近,在壁面边界尺寸大于 1 m 时,相对误差小于 2.7%,边界尺寸等于 4 m 左右时相对误差趋近于 0,随后相对误差随着壁面边长的增大逐渐增大并趋于平稳,但一直小于 3%。对于地板,当边长大于 1 m 时,角系数的半解析解与数值模拟解相对误差在 7.5%左右,对其进行了修正后,相对误差小于 1%。

参考文献:

[1] WANG Y Y, HUANG Z W, LU Y H, et al. Heat transfer properties of the numerical human body simulated the thermal manikin [J]. The Journal of the

- Textile Institute, 2013, 104(2):178-187.
- [2] 郑德晓, 李念平, 杨昌智. 辐射空调房间表面的角系数[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(1):55-60.
ZHENG D X, LI N P, YANG C Z. Angle factors between surfaces in a radiant air-conditioned room [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(1):55-60. (in Chinese)
- [3] WANG Y, MENG X, ZHANG L L, et al. Angle Factor Calculation for the Thermal Radiation Environment of the Human Body [C]//Li Angui. Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Xi'an, China, 2013:447-456.
- [4] 堀越哲美, 小林阳太郎, 陈启高. 关于热辐射在人体上影响的计算[J]. 四川建筑科学研究, 1978(1):77-89.
HORIKOSHI T, KOBAYASHI Y, CHEN Q G. Calculation about the Influence of Heat Radiation on Human Body [J]. Sichuan Building Science, 1978(1):77-89. (in Chinese)
- [5] 魏庆芑, 江亿. 求解热源与围护结构内表面之间角系数的半解析方法[C]//全国暖通空调制冷2002年学术年会论文集, 广州, 2002:1057-1060.
WEI Q P, JIANG Y. Semi-analytical method of solving the angle factor between the heat source and the inner envelope surfaces [C]// Proceedings of the National Academic Conference on Heating, Ventilation, Air Conditioning & Refrigeration, Guangzhou, China, 2002:1057-1060. (in Chinese)
- [6] FANGER P O, ANGELIUS O, JENSEN P K. Radiation data for the human body [J]. ASHRAE Transaction, 1970, 76(2):338-373
- [7] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [Z]. ASHRAE Handbook 2005, 2005, Chapter 8:9-10.
- [8] CANNISTRO G, FRANZITTA G, GIACONIA C. Algorithms for the calculation of the view factors between human body and rectangular surfaces in parallelepiped environments [J]. Energy and Buildings, 1992, 19:51-60.
- [9] HORIKOSHI T, TSOCHIKRWA, KOBAYASHI Y. The effective radiation area and angle factor between man and a rectangular plane near him [J]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(1):60-61.
- [10] JONES B W, HONG S, MCCULLOUGH E A. Detailed projected area data for the human body [J]. ASHRAE Transactions, 1998, 104(2):791-805.
- [11] YOSHIICHI O, CHIE N, MASAOKI K. Numerical calculation of angle factors between human body and rectangular planes [C]//Awbi H B. Air Distribution in Rooms, 2000:27-33.
- [12] MASAKI M, HITOSHI Y, KOJI S. Shape factor simulation for the thermal radiation environment of the human body and the VRML visualization [J]. Building and Environment, 2004, 39(8):927-937.
- [13] GHADDAR N, SALAM M, GHALI K. Steady thermal comfort by radiant heat transfer: the Impact of the heater position [J]. Heat Transfer Engineering, 2006, 27(7):29-40.
- [14] 章熙民, 任泽霏, 梅飞鸣, 等. 传热学 [M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007:226-247.
ZHANG X M, REN Z P, MEI F M, et al. Heat transfer [M]. 5nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007:226-243. (in Chinese)
- [15] TANABE S, CHIE N, YOSHIICHI O, et al. Effective radiation area of human body calculated by a numerical simulation [J]. Energy and Buildings, 2000, 32(2):205-215.
- [16] MASAKI M, HITOSHI Y, KOJI S. Shape factor simulation for the thermal radiation environment of the human body and the VRML visualization [J]. Building and Environment, 2004, 39(8):927-937.
- [17] 刘宝善, 郭小朝, 马雪松. 中国男性飞行员人体尺寸测量实用性特征 [J]. 人类工效学, 2002, 8(4):1-3.
LIU B S, GUO X C, MA X S. Character of anthropometry usefulness for Chinese male pilot [J]. Ergonomics, 2002, 8(4):1-3. (in Chinese)
- [18] 呼慧敏, 晁储芝, 赵朝义, 等. 中国成年人人体尺寸数据相关性研究 [J]. 人类工效学, 2014, 20(3):49-53.
HU H M, CHAO C Z, ZHAO C Y, et al. Research of relationship for Chinese human dimensions [J]. Ergonomics, 2014, 20(3):49-53. (in Chinese)
- [19] 马广韬, 丁娟. 坐卧类家具设计的人体静态尺寸研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(1):176-181.
MA G T, DING J. Research on sitting-and-lying furniture design based on human dimensions [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2012, 28(1):176-181. (in Chinese)
- [20] 李百战, 郑洁, 姚润明, 等. 室内热环境与人体热舒适 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012:23-43.
LI B Z, ZHENG J, YAO R M, et al. Indoor thermal environment and human thermal comfort [M]. Congqing: Chongqing University Press, 2012:23-43. (in Chinese)
- [21] TOSHIYUKI M, WATARU U, YUKIO N. Simplified human body model for evaluating thermal radiant environment in a radiant cooled space [J]. Building and Environment, 2001, 36:801-808.