

运动着装人体热生理仿真系统设计*

滕毅¹, 焦姣², 马焯文¹, 王若梅³

1. 广东第二师范学院计算机学院, 广东 广州 510303
2. 香港浸会大学许士芬博士体康研究中心, 香港 999077
3. 中山大学计算机学院, 广东 广州 510275

摘要: 有效量化运动中着装人体的热生理状态, 并提前预测着装的热舒适性, 对于健康监测、分析和预防事故具有重要意义. 本文从“运动”特征出发, 定义服装通风因子量化通风效应, 再将服装通风效应与着装人体的热生理模型结合, 构建考虑服装通风效应的运动着装人体热生理数学模型. 本文以该模型为基础, 综合考虑行业应用的便捷性和复杂数学模型的多个参数的可计算性, 提出着装人体热生理仿真系统框架, 设计并实现了运动着装人体的热生理仿真系统, 预测运动过程中人体着装时的不同生理状态, 规避可能出现温度失衡的风险.

关键词: 服装通风效应; 运动着装人体; 热生理仿真; 仿真系统

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2023) 04-0147-11

A thermal performance predicting CAD system of clothed human during exercise

TENG Yi¹, JIAO Jiao², MA Zhuowen¹, WANG Ruomei³

1. School of Computer Science, Guangdong University of Education, Guangzhou 510303, China
2. Dr Stephen Hui Research Centre for Physical Recreation and Wellness, Hong Kong Baptist University, Hong Kong 999077, China
3. School of Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Effectively quantifying the thermal performance of the clothed human body during exercise and to predict the thermal performance when wearing clothing in advance, are of great significance for health monitoring and analysis, and accident prevention. In this study, a mathematical model of a clothed human during exercise is selected to predict the thermal performance by considering the quantified effects of clothing pumping effect in the human-clothing-environment boundary model. With comprehensive consideration of the convenience of industry applications and the computability of the complex mathematical model, simulation framework is proposed, according to which, a CAD system of the clothed-human's thermophysiology is developed. The CAD system can predict the thermophysiological responses of the human body in advance when wearing different kinds of clothing and consequently prevent occurring of thermal-related accident during exercise. It can be implemented to the development of thermal-functional clothing, and have the advantage of saving time, manpower and other unnecessary cost as compared with the traditional clothing development process.

Key words: clothing pumping effect; clothed human; thermal performance simulation; CAD system

* 收稿日期: 2021-12-13

录用日期: 2022-11-03

网络首发日期: 2023-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(62172452); 广东省普通高校青年创新人才类项目(2021KQNCX061); 广州市科技计划项目(202102021240)

作者简介: 滕毅(1986年生), 女; 研究方向: 服装热湿模型及热功能性仿真工程应用; E-mail: tengyi@gdei.edu.cn

通信作者: 王若梅(1961年生), 女; 研究方向: 人体热湿仿真、运动健康监测; E-mail: isswrm@mail.sysu.edu.cn

科学的运动可以降低慢性疾病的发生,减少久坐生活方式对健康的负面影响,并可能有效地延长寿命(王正珍,2020)。运动也可能导致负面影响,在运动过程中随着运动强度的增加,会出现呼吸加速、口渴,甚至多种有害健康的现象如头晕、失温、呼吸困难、猝死等(王秀荣,2018;吴静,2020;陶佳,2021)。如何有效预测运动中着装人体的重要生理指标(如人体核心温度、皮肤温度、出汗量、心率等),提前规避运动健康风险,成为当前亟待解决的问题。

在当前运动健康研究工作中,基于运动数据的实时监测和基于数据挖掘的健康量化是最为主要的两种方式。人体运动数据实时监测主要通过计算机网络和传感器构建一个实时的人体数据收集、量化系统(贾楠等,2020),如芬兰POLAR公司的运动心率表产品(陈毅能等,2015),美国风和公司的Lifeshirt(Lee et al., 2016)。鲁亚磊等(2018)在基于德州仪器(TI)公司CC2530片上系统设计了一套运动数据采集系统,并提出一种可靠的无线传输协议。张宪文等(2020)设计了一款基于Android系统的运动健康类APP,借助蓝牙通信和SQLite数据库,利用互联网,让运动员随时了解自身的运动情况。这类系统有助于健身者监测运动中的生理变化其主要侧重于实时监测、实时量化,但当进行实时预警时,人体很大可能性已处于危险状态或危险临界状态,这样人体还是存在一定健康风险。此外,这类系统通常有传感器等穿戴设备,造成一定的经济成本。基于数据挖掘的健康量化方法,则是利用大量用户历史运动数据对某种疾病的心电图或拍片等进行识别和事故概率的判断。如,冯敏等(2019)采用随机森林方法对500多名学生的健康量表分析,结合健康测试,建立随机森林模型对影响因素进行降维,找到重要影响因素间的相互作用。Li et al. (2012)利用多层感知神经网络对脉冲质量进行评估,从而判断心脏疾病。张崇林等(2020)通过关联规则数据挖掘,发现不同体育锻炼行为阶段大学生体质健康特征知识。以体育锻炼行为阶段为输出、体质指标为输入构建关联规则数据挖掘模型。基于数据挖掘方法有一个弊端,若缺乏足够的业务数据分析,则会影响到该方法的准确性。

为了克服上述问题,本文提出一种基于着装人体的热生理仿真系统对运动着装人体热生理状态进行仿真预测的方法。着装人体热湿传输仿真研究一直是国内外研究人员关注的热点问题,从1972年提出的单节点人体热生理调节模型至今(Stolwijk et al., 1966; Fanger, 1970; 朱光, 2009; Mao et al., 2011; Holopainen, 2012; 孙滢, 2019; 赵蒙蒙等, 2019; 贾楠等, 2020; 曲鑫璐等, 2020),在模拟仿真方面,从基本概念、基本规律、数学模型、测试方法、评价指标、热湿传输机理等都取得了许多重要的成果。然而,运动着装人体的热生理预测问题是一个复杂的跨学科问题,涉及到运动生理、纺织材料、服装设计、计算机仿真、数值计算等。在对该问题建模过程中,不仅需要考虑多节点人体热生理调节模型、多层织物的动态热湿传递模型,以及服装人体边界模型等,还要考虑到“运动”这一特征。运动着装人体和非运动着装人体热生理调节相比,某些人体或者服装的参数会随着运动进程的推进而发生变化。例如,着装人体穿着一件宽松T恤,从衣服的底部到领口是一个具有流通性的整体空间,由于人体、服装和环境之间具有热湿差,微环境(人体和服装间)中的空气层和水蒸气会扩散,从而起到热湿交换作用(苑秀明,2012)。运动中,尤其是身着宽松的衣物,人体和服装间的空气厚度层可能会随着运动而发生动态变化,导致微环境中的空气层突然被挤出,在这过程中,同样会带走水分和热量,这就是服装的通风效应(Jia et al., 2019)。因此,为了更加高效和准确地预测运动中着装人体热生理指标,在现有的着装人体热生理仿真的研究基础上,叠加考虑运动中服装的通风效应影响非常重要(滕毅等,2021)。如图1所示,从着装人体的运动场景出发,分析其相关的因素包含:人体、服装、运动环境、运动种类等,同时还需要考虑运动中服装通风效应的影响。然后通过数学建模、计算机仿真等技术,实现对运动着装人体的热生理性能的提前预测,提前规避风险。

综上所述,本文的具体工作包括:1)采用计算机仿真技术对考虑服装通风效应的着装人体热生理仿真模型进行数值求解;2)结合计算机仿真技术对模型求解,并设计仿真系统框架;3)从运动着装人体的生理学角度出发,提炼仿真参数,设计针对运动着装人体的热生理仿真CAD系统并应用计算机可视化方法对仿真结果进行呈现。为了增强行业应用性,建立面向人体运动健康仿真平台,提供着装人体运动场景设计功能、模型仿真以及结果量化功能。



图1 运动着装人体健康预测示意图

Fig. 1 Illustration figure showing the prediction of human health during exercise

1 考虑服装通风效应的运动着装人体热生理仿真系统框架

考虑服装通风效应的着装人体热生理仿真系统的研究具有重要的理论研究价值(如图2所示), 具体体现为四方面. 第一, 着装人体热生理仿真系统的研究是一个多学科交叉融合问题, 包括生理学、纺织材料学、数学以及计算机学, 相关内容包括运动生理、热生理、人体能量代谢、服装材料、功能性服装设计、数学建模技术、偏微分方程组(PDEs, partial differential equations)、数值计算以及计算机仿真等. 第二, 该研究是一个“多模型组合预测”问题, 由4个模型按照一定的耦合关系, 组合建模, 最终实现运动热生理关键指标预测. 第三, 该研究需要应用“多策略组合建模”技术, 首先需要采用组合建模策略将人体的热生理调节模型、人体新陈代谢模型、服装动态热湿传递模型以及边界模型按照数据流相关性构建运动着装人体的热生理仿真预测模型. 第四, 该研究最终在建模及求解过程中涉及到多维数据以及模型解析, 在建模过程中, 人体被划分为多节点模型, 将每个节点及其覆盖的服装(包括节点表面与服装内表面组成的微环境)被看作一个单独的部分, 在模型解析过程中, 人体每个节点有其局部热生理指标, 同时该部分所覆盖的服装需要在时间维度和厚度方向进行网络离散化, 用于探究运动状态中人体热生理指标变化以及服装在厚度方向上温度和湿度的变化.

为了分析运动着装人体热湿传输过程中的动态热生理指标, 在运动前实现对运动着装人体的热生理预测的目标, 针对该问题设计“四步”的仿真流程(图3), 包含: 仿真条件设定、模型建立、模型计算以及仿真结果的示意图. 第一步, “仿真条件定义”主要针对运动着装人体的特性, 综合分析模型计算中所关联的相关参数, 从人体、服装、环境、运动以及边界5个部分进行参数的定义, 为后续模型的求解做好准备. 第二步, “仿真模型构建”是在经典的人体热生理调节模型以及服装动态热湿传递模型的基础上, 针对本课题“运动”以及“着装”两个关键特性, 采用组合建模的策略, 建立了考虑服装通风效应的运动着装人体的热生理预测模型. 第三步, “仿真计算求解”采用有限元分析方法对偏微分方程组进行离散化处理, 采用数值运算的方法不断迭代, 计算在每个运动步长的人体热湿生理参数以及服装的相关参数. 第四步, “仿真结果呈现”是指针对模型的计算的输出结果, 采用计算机可视化技术对仿真结果进行直观、科学的呈现.

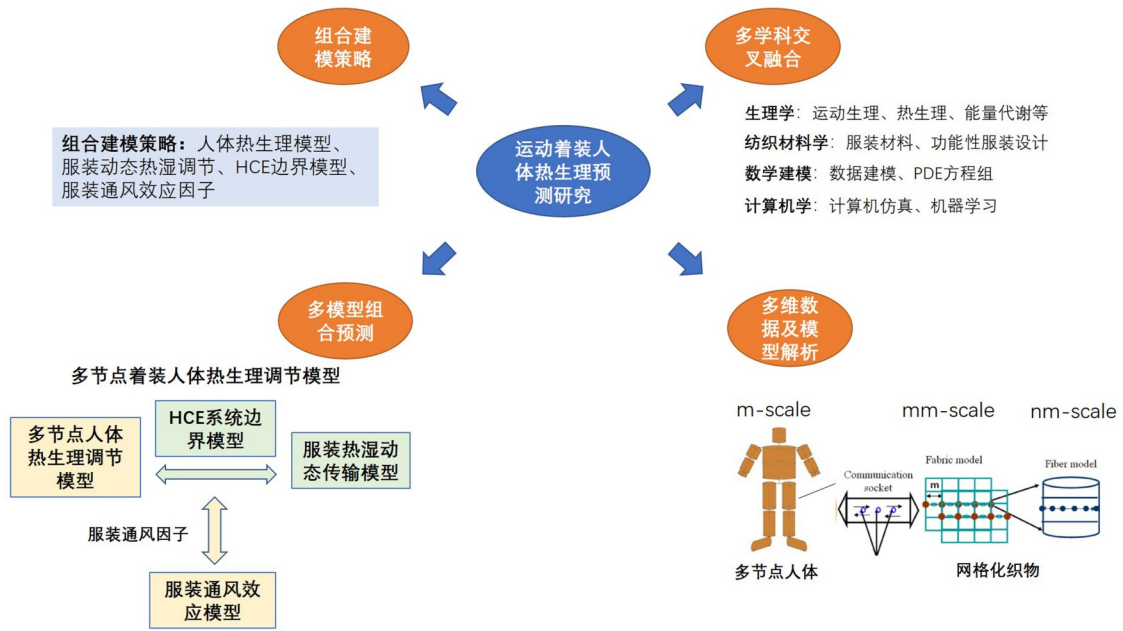


图2 运动着装人体热生理仿真理论研究意义

Fig. 2 The significance of theoretical research on clothed human thermal performance simulation

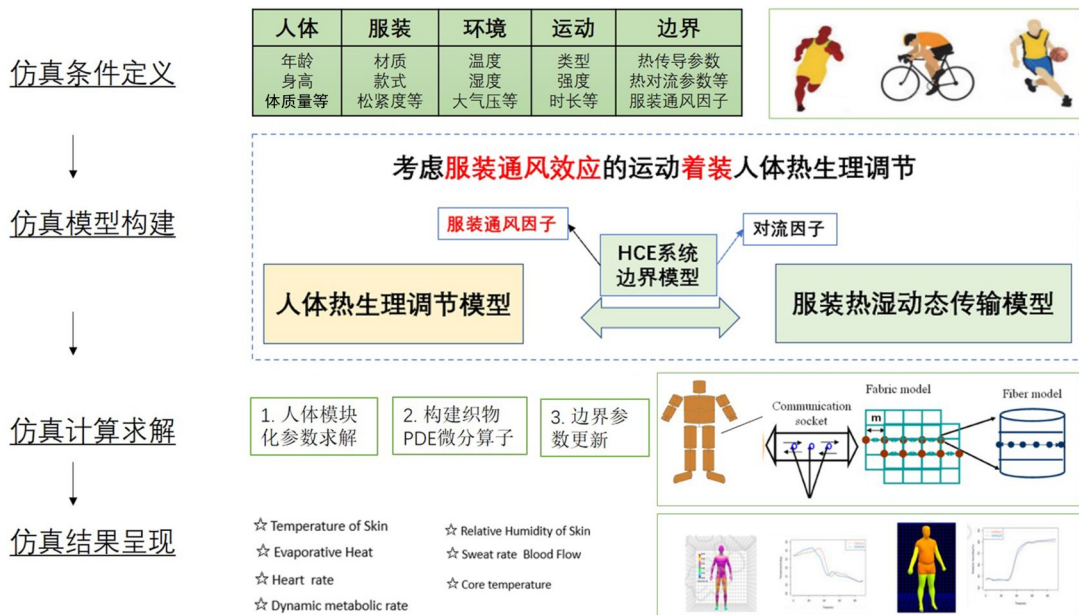


图3 运动着装人体热生理仿真模型总体框架

Fig. 3 The framework of clothed human thermal performance simulation model

2 仿真条件定义

仿真条件定义是仿真系统的输入模块，实现参数的收集、整合和提取，再交给仿真模型进行仿真计算。该系统的仿真条件定义部分是从运动场景出发，将影响到运动着装人体生理状态结果的参数进行系统化的梳理，再结合设计的过程采用分步骤的方法实现参数的采集。运动着装人体的热生理仿真预测涉及到人体、服装、运动、环境、边界及仿真控制参数等6个要素，所以在仿真条件定义过程中，依据6个过程的先后逻辑依次定义，提炼为：活动定义、环境定义、人体定义、服装定义、边界条件定义和控制条件定义。其中，活动主要是指着装运动场景中从事活动的定义，如：跑步、睡觉或者爬山等，该项活动持续

的时间长度以及活动强度、人体做各种不同的运动时对应着不同的新陈代谢速率. 环境是指运动场景中外界环境参数, 如: 温度、湿度、天气(温和、小雨、中雨和大雨等等)、大气压和风速等. 人体是指着装运动场景中人体的个体参数, 包括了人体的大量生理参数, 人的性别、种族、身高、体质量、温度、湿度、传热系数、血流速度等. 服装部分是该设计模块中的最重要同时也是最复杂的部分. 在模型计算过程, 服装的材料、款式、覆盖率、松紧程度、布料的厚度、组成布料的纤维种类以及纤维特性等参数均会对仿真结果有影响, 所以服装定义需要包含这些重要参数. 边界条件主要是指在人体—服装—环境边界处的传热传质参数进行定义, 包括对流系数、通风系数、传热传质系数等. 控制条件定义主要是涉及到模型仿真的设置参数, 如时间步长的选取, 多层织物在厚度方向步长的选取等(系统有默认参数, 通常用默认参数即可).

由于参数的复杂性和专业性, 人性化的界面设计对此前处理数据采集是非常重要的, 同时, 为了满足行业应用需要, 在仿真系统中需要对仿真条件的定义过程加以设计. 如图4所示, 最终仿真前处理过程被提炼为6步, 包括: 定义活动、定于环境、定义人体、定义服装、定义边界条件以及定义控制条件.

以着装人体的一个跑步场景为示例, 说明前处理过程中参数的定义. 跑步运动员穿着跑步服先散步 20 min 再以 15 km/h 速度跑步 30 min, 现要针对该场景中的运动员热生理舒适性进行预测. 如图4所示, 前处理过程中第1步是定义活动, 是指着装人体所从事的活动类型及时间, 在该场景中, 定义为散步活动 20 min, 再 15 km/h 快跑活动 30 min; 第2步: 环境定义. 该场景中环境定义为一个标准大气压下, 室温 20 °C, 相对湿度 80%, 风速为 0.5 m/s; 第3步, 人体定义. 男性, 身高 180 cm, 体质量 80 kg 等; 第4步, 定义服装, 长衣长裤, 覆盖率为 100%, 宽松款式, 面料成分为 88% 聚酯纤维和 12% 氨纶等; 第5步, 定义边界条件, 服装在躯干部位的通风因子为 10% 等. 所有的设计的参数由着装人体所从事的运动、气候环境、人体、服装本身的设计以及“人体—服装—环境”(HCE, human clothing environment)的边界所构成(滕毅等, 2022).

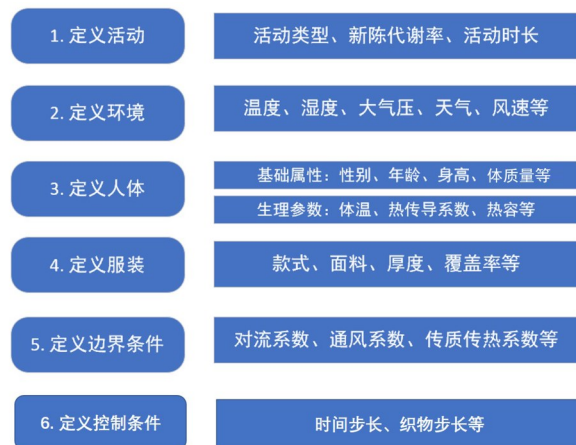


图4 运动着装人体热生理仿真前处理六步曲

Fig. 4 Six-step preprocessing for clothed human thermal performance simulation during exercise

3 考虑服装通风效应的着装人体热生理数学模型

考虑服装通风效应的运动着装人体热生理数学模型(Teng et al., 2022)是将人体热生理调节模型与多层织物的热湿传递模型相结合, 并在人体—服装—环境系统的边界模型中加入服装通风因子. 其中, 人体的热生理调节模型通过将 25 节点人体热生理调节模型(Stolwijk et al., 1966), 织物模型为多层织物的热湿传递模型(Wang et al., 2003). 服装通风效应描述了通过皮肤和衣物内层之间的微气候环境带走着装人体的热量和水分. 织物内表面(靠近人体皮肤部分)传热传质涉及多个物理过程, 包括: 对流、蒸发/冷凝和服装通风效应等过程, 应当遵循质量守恒定律和能量守恒定律.

服装内表面上的水蒸气质量守恒方程

$$\frac{D_a}{\tau_a} \frac{\partial(C_a \varepsilon_a)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -(1 - p_m) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_m (C_{sk} - C_0) - \frac{p_m}{\lambda} E_{sk}, \quad (1)$$

公式左边是衣服内层积聚的水汽. 在公式右边, 参数 p_m 为水蒸气质量通风率(%), 服装通风效应引起服装内表面的水蒸气浓度变化为 $\frac{p_m}{\lambda} E_{sk}$; 服装内表层被对流效应引起蒸汽浓度变化为 $(1 - p_m) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_m (C_{sk} - C_0)$

(Angelova, 2015; Mao et al., 2017), 其中 C_{sk} 为人体皮肤表面的水蒸气浓度.

服装内表面上的能量守恒方程

$$K(0, t) \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = -(1 - p_h)H_C(T_{sk} - T_0) - \lambda_{lg}h_{lg}(C_{sk} - C^*(T_0)) - p_hE_{sk}, \quad (2)$$

其中 p_h 为微环境服装热量通风率(%). 在紧贴皮肤的服装内表面($x = 0$)处, 在皮肤表面与服装之间的动态传热过程中, 百分比为 p_h 的蒸发热通过服装通风效应由人体皮肤散发到环境中. 衣服内层的热量变化等于对流效应传递的热量 $(1 - p_h)H_C(T_{sk} - T_0)$ 、蒸发/冷凝过程的热量 $\lambda_{lg}h_{lg}(C_{sk} - C^*(T_0))$ 和服装通风效应的热量 p_hE_{sk} 之和.

考虑到这一点, 热湿平衡模拟方程(即两层织物间微环境中的水蒸气质量守恒方程)如下:

$$\frac{D_a}{\tau_a} \left. \frac{\partial(C_a \varepsilon_a)}{\partial x} \right|_{x=0} = -(1 - p_m) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_m(C_{a0} - C_{0B}) - \frac{P_m}{\lambda} E_{fab}. \quad (3)$$

其中 p_m 为水蒸气质量通风率(%), 服装通风效应产生的水蒸气质量变化等于 $\frac{P_m}{\lambda} E_{fab}$. 两层织物间微环境中的水蒸气浓度变化等于微环境中因对流和服装通风效应产生的质量变化之和.

两层织物间微环境中热量平衡方程

$$K_{mix} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = -(1 - p_h) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_C(T_{0B} - T_0) - \lambda_{lg}h_{lg} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} (C_0 - C^*(T_{0B})) - p_hE_{fab}, \quad (4)$$

其中 p_h 为两织物层间微气候环境服装热量通风率(%). 服装通风效应产生的热量变化等于 p_hE_{fab} . 两个织物层之间微环境的热平衡受热对流、蒸发/冷凝和服装通风效应影响.

人体是一个非几何对称的实体, 各组织、器官和系统等非均匀分布在身体各部位, 直接影响人体运动生理机制的运行. 为了描述该现象, 25 节点人体模型是较为典型且应用广泛的非均匀多节点模型, 根据人体生理特征及分布情况将人体划分为 6 个部分, 分别为头、躯干、臂、手、腿、足; 同时, 每个分为包括 4 层: 内核、肌肉、脂肪和皮肤. 此外, 该模型还给出一个中心血液池, 用于连接身体各部分动脉、静脉血管, 模拟人体血液循环系统(贾楠等, 2020). 如图 5 所示, 为了预测运动中着装人体的热生理状态, 由于人体每个部位的着装环境都可能不同(Mao et al., 2016; Awais et al., 2018; Teng et al., 2022). 单独观察每个身体部位, 均有其穿着场景, 包括是否被衣服覆盖或直接暴露在环境中, 衣服的松紧度和厚度. 不同的场景会影响该部位的热量和水分散失, 同时该部位与其他部位通过血液循环交换热量, 从而影响着装人体的热生理状态. 对于有服装覆盖的身体部位, 服装是皮肤表面与环境热交换的屏障, 不仅需要考人体—服装—环境的共同作用, 还需考虑运动中可能存在的服装通风效应.

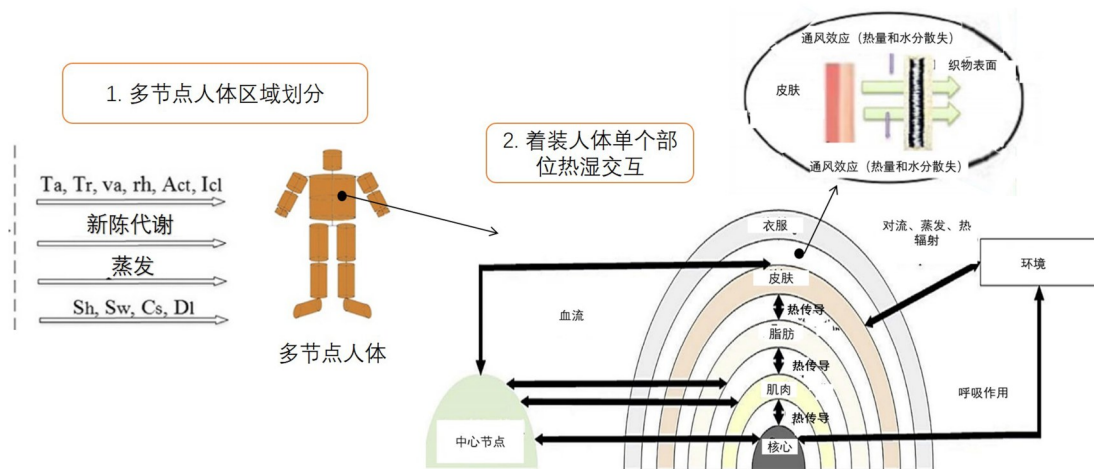


图 5 多节点着装人体模型

Fig. 5 Multi-node clothed human model

通过将上述方程(1)~(4)所示的服装通风效应的数学模型, 整合到着装人体的热生理模型, 考虑了HCE系统中服装通风效应的边界模型需更新, 包括以下4个部分(Teng et al., 2022).

(i) 紧挨皮肤的第1层织物的内表面: 当织物紧密接触皮肤时, 则不考虑服装通风效应, 此时在织物内层的水蒸气浓度等于皮肤表面的饱和水蒸气浓度. 如果皮肤和织物之间存在空间, 则在模拟靠近皮肤的织物层($x=0$)边界条件时需要考虑蒸汽扩散和服装通风效应. 边界条件模型概括为

$$\begin{aligned} \left. \frac{D_a}{\tau_a} \frac{\partial(C_a \varepsilon_a)}{\partial x} \right|_{x=0} &= -(1-p_m) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_m (C_{sk} - C_0) - \frac{P_m}{\lambda} E_{sk}, \quad (\text{织物未接触皮肤}) \\ C_{a0} &= C^*(T_0), \quad (\text{织物紧贴皮肤}) \\ \left. \frac{D_1}{\tau_1} \frac{\partial(\rho_1 \varepsilon_1)}{\partial x} \right|_{x=0} &= \begin{cases} 1 - \varepsilon_f, & (\text{织物紧贴皮肤}) \\ \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} h_{lg} (C^*(T_0) - T_{0B}), & (\text{织物未接触皮肤}) \end{cases} \\ K(0, t) \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} &= \begin{cases} \frac{K_0}{\Delta x} (T_{sk} - T_0), & (\text{织物紧贴皮肤}) \\ -(1-p_h) H_C (T_{sk} - T_0) - \lambda_{lg} h_{lg} (C_{sk} - C^*(T_0)) - p_h E_{sk}, & (\text{织物未接触皮肤}) \end{cases} \end{aligned}$$

(ii) 第*i*层织物的内表面紧靠第*i*-1层织物的外表面: 当两层织物紧贴时, 第*i*层织物内表面的水蒸气浓度等于第*i*-1层织物外层的水蒸气浓度. 否则, 需要考虑对流和服装通风效应的影响, 因为如果两层织物层之间存在空间, 则存在水蒸气浓度差异. 它们之间的热交换与对流、蒸发/冷凝和服装通风效应等过程相关. 该边界条件的模型概括为

$$\begin{aligned} \left. \frac{D_a}{\tau_a} \frac{\partial(C_a \varepsilon_a)}{\partial x} \right|_{x=0} &= \begin{cases} C_{a0} = C_{0B}, & (\text{两层织物紧贴}) \\ -(1-p_m) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_m (C_{a0} - C_{0B}) - \frac{P_m}{\lambda} E_{fab}, & (\text{两层织物有空隙}) \end{cases} \\ \left. \frac{D_1}{\tau_1} \frac{\partial(\rho_1 \varepsilon_1)}{\partial x} \right|_{x=0} &= \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} h_{lg} (C^*(T_0) - T_{0B}), \quad (\text{两层织物有空隙}) \\ K_{mix} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} &= -(1-p_h) \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_C (T_{0B} - T_0) - \lambda_{lg} h_{lg} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} (C_0 - C^*(T_{0B})) - p_h E_{fab}. \end{aligned}$$

(iii) 第*i*层织物的外表面紧靠第*i*+1层织物的内表面: 如果织物层的外侧紧靠织物的另一侧, 则边界条件可表示为

$$\begin{aligned} \left. \frac{D_a}{\tau_a} \frac{\partial(C_a \varepsilon_a)}{\partial x} \right|_{x=L} &= \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_m (C_N - C_{NB}), \quad (\text{两层织物有空隙}) \\ C_{aN} &= C_{aNB}, \quad (\text{两层织物紧贴}) \\ \left. \frac{D_1}{\tau_1} \frac{\partial(\rho_1 \varepsilon_1)}{\partial x} \right|_{x=L} &= \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} h_{lg} (C^*(T_N) - T_{NB}), \quad (\text{两层织物有空隙}) \\ K_{mix} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} &= H_C (T_N - T_{NB}) + \lambda_{lg} h_{lg} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} (C_N - C^*(T_{NB})). \end{aligned}$$

(iv) 第*i*层织物的外表面直接对周围环境: 对于外表面暴露在环境中的织物层, 边界条件可表示为

$$\begin{aligned} \left. \frac{D_a}{\tau_a} \frac{\partial(C_a \varepsilon_a)}{\partial x} \right|_{x=L} &= \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon} H_m (C_e - C_N), \\ \left. \frac{D_1}{\tau_1} \frac{\partial(\rho_1 \varepsilon_1)}{\partial x} \right|_{x=L} &= \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} h_{lg} (C_N - C^*(T_e)), \\ K_{mix} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} &= H_C (T_e - T_N) + \lambda_{lg} h_{lg} (C_e - C^*(T_N)). \end{aligned}$$

该模型有效性已经被实验数据验证并公开发表(Teng et al., 2022). 所以, 本文对该模型的有效性不做验证.

4 运动着装人体热生理仿真模型计算框架

本文建立了模型的计算框架,在多结点的人体模型中,人体根据热感应的不同划分成几个主要的区域,在每个区域中覆盖的服装从内表面,在服装厚度方向上进行数值离散化形成空间模块参数约束的仿真区域.针对模型中复杂的服装和人体形成微环境的边界条件,我们可以根据多节点人体—服装模块空间的划分进行处理.建立了仿真模型计算框架后,我们需要设计仿真计算机流程对数学模型计算.图6表示了该模型的仿真计算流程.

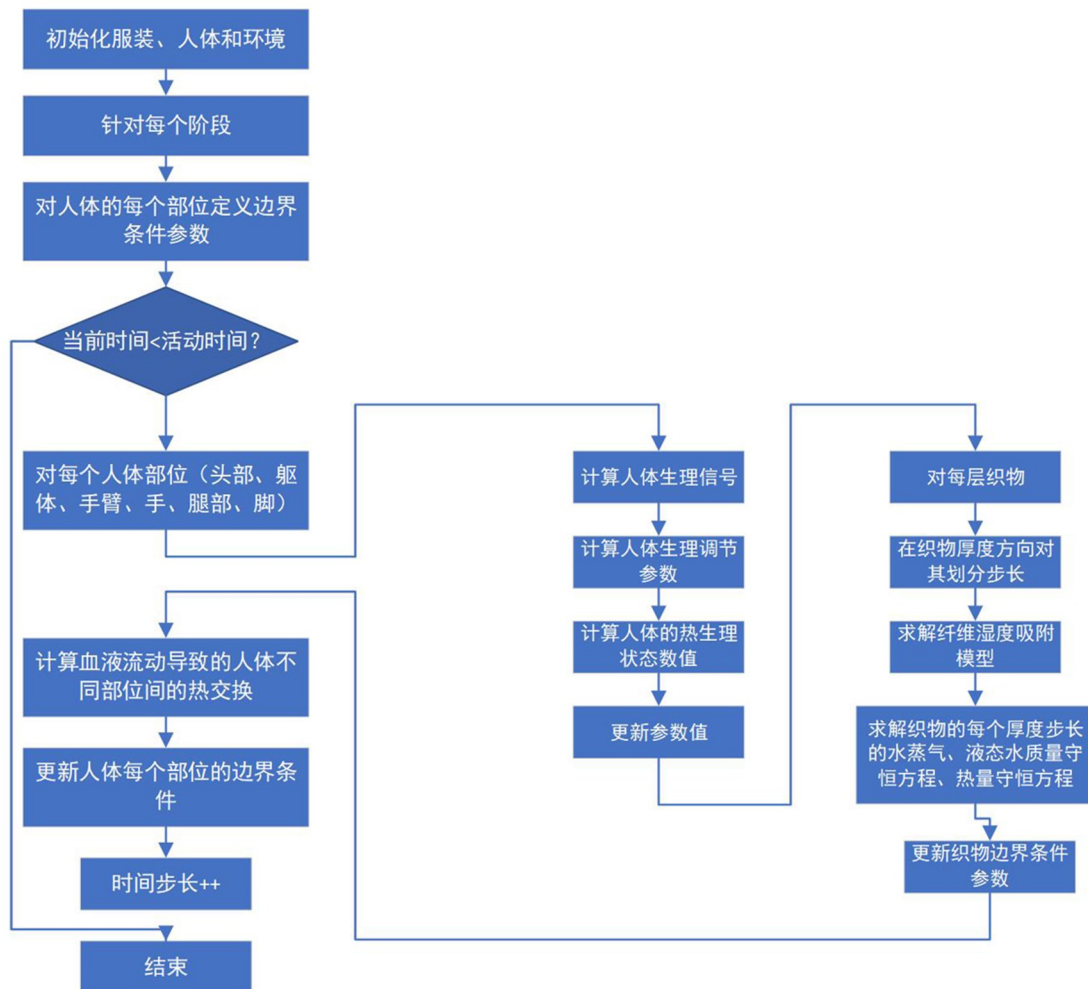


图6 仿真计算流程

Fig. 6 Simulation calculation process

首先,利用有限元分析方法对偏微分方程组进行离散化处理,采用数值运算的方法迭代计算在每个运动步长的人体热湿生理参数以及服装的相关参数,具体流程如下:

- (i) 初始化人体、服装以及环境相关的初始状态变量,如人体的生理参数,服装材质、款式、松紧程度、覆盖率、开口情况等,环境温度、湿度、气压及风速等;
- (ii) 针对每个活动开始时刻,对每个人体部位,初始化边界参数;
- (iii) 在每个时间步长,针对人体的每个部位,首先需要计算人体热生理调节模型,按照时间步长迭代计算一次,然后按照覆盖在该部位的服装看作是多层织物,按照服装内表层和人体的不同的接触状态,设定内层织物的边界条件,再按照多层织物的热湿仿真模型进行计算机仿真运算;
- (iv) 计算人体不同部位因为血液流程造成的不同部位间的热传递;
- (v) 按照边界模型,更新每个部位的边界值;

(vi) 该时间步长计算结束, 时间步长增1;

(vii) 查看时间步长与活动时间关系, 看是否继续运算; 若时间达到活动时间, 则结束(滕毅等, 2021)。

5 仿真结果可视化

仿真结果涉及人体多个部位的人体和对应部位服装的热生理参数, 包括人体的皮肤问题、核心温度、相对湿度、织物的温度等参数, 包含大量的数据. 数值结果很难直观显示相应的参数的变化趋势, 所以, 本论文采用可视化技术对数值结果进行展示.

如图7所示, 通过将文件中的数据转化为二维和三维图形, 同时将人体各个部位的热生理参数以及织物、纤维的相关热湿属性进行显示. 通过图形化的表示方式直观表示相应参数在整个运动过程中的相应属性变化趋势和数值.

如图8所示, 为了更好地显示在运动中热生理指标的变化趋势, 采用颜色条对应具体参数数值, 采用三维动态技术展示运动中重要的热生理指标(人体核心温度、皮肤温度)随时间的变化趋势.

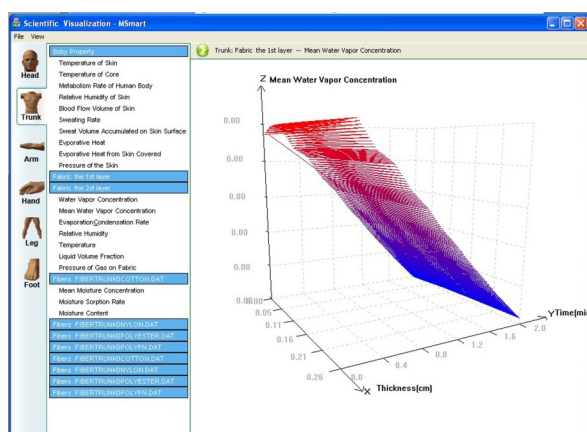


图7 二维结果可视化示意图

Fig. 7 Diagram for visualizing two-dimensional simulation results

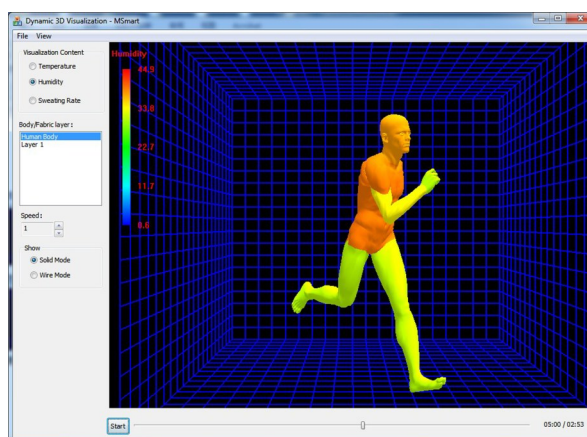


图8 三维可视化示意图

Fig. 8 Diagram for visualizing three-dimensional simulation results

6 CAD系统

运动着装人体热生理仿真过程包含仿真条件定义、仿真模型构建、仿真计算以及结果显示4个步骤. 其中仿真模型和仿真计算已分别在第二节和第四节中阐述. 本节主要对仿真的主要界面进行说明.

图9显示仿真系统主界面, 用户按照左边按钮所示意的8个步骤按顺序进行操作即可得到仿真结果, 分别是: 定义活动、定义环境、定义人体、定义服装、定义边界条件、定义控制条件(仿真参数设置, 如时间步长等)、计算仿真模型以及显示结果. 第一, 活动定义是对运动人体从事的活动过程进行定义, 可以包含多个活动阶段. 如某人先休息5 min、再慢走10 min、慢跑5 min到15 km/h快跑20 min这个过程可以分解为4个活动过程, 先选好活动过程, 再依次定义每个活动对应的人体新陈代谢强度以及每个活动阶段时长即可. 第二, 考虑到每个活动过程的外界环境可能不同, 因此, 完成定义活动之后, 依次定义每个活动对应的外界



图9 仿真系统主界面

Fig. 9 Main interface of the simulation system

环境, 主要包含环境的温度、湿度、风速、大气压和天气等因素. 第三, 由于人体个人参数对仿真结果有影响, 需要在系统设计中设计人体定义的界面, 主要包括人体的性别、年龄、人种、三围尺寸以及人体的生理参数等. 第四, 服装需要依次定义每个部位的服装. 服装与模型相关的参数包含服装在该部位的层数、身体各部位的覆盖比例、服装的面料、厚度等信息. 织物面料的定义包含所构成的纤维的种类、厚度、密度、液体接触角度等. 第五, 考虑到在每个运动阶段, 人体每个部位对应的边界环境可能不同, 按照活动顺序, 依次按照人体的各个部位定义边界条件, 主要包括对服装与人体的接触状态、边界处的传热传质参数、服装质量和热量通风因子. 第六, 主要是仿真设置类型的参数定义. 前面这 6 个步骤主要是针对仿真前处理过程中对于运动着装人体的运动场景进行设置. 完成之后, 可以直接进行第七步仿真计算, 仿真完成后可以进入第八步, 查看图形化的仿真结果.

7 结 论

本文以考虑服装通风效应的运动着装人体热生理仿真预测模型为基础, 综合考虑行业应用的便捷性和复杂数学模型的多个参数的可计算性, 提出运动着装人体热生理仿真系统框架, 设计并实现了运动着装人体的热生理仿真系统. 尤其根据设计参数和计算参数, 将仿真前处理提炼为 6 个步骤, 包括: 定义活动、定义环境、定义人体、定义衣服、定义边界以及控制条件. 该系统可用于提前预测运动过程中着装人体热生理状态, 可用于提前规避可能出现温度失衡的风险. 同时, 此系统可广泛应用于热功能性服装的设计和研发, 较传统的研发流程更节约人力、时间和不必要的成本.

参考文献:

- 陈毅能, 路璐, 胡伟平, 等, 2015. *PhysiolComp Toolkit: 一个生理计算交互工具箱的分析与设计*[J]. *计算机学报*, 38(12): 2464-2476.
- 冯敏, 冯辉, 张一雨, 等, 2019. 随机森林模型分析大学生体质健康影响因素: 来源于同济大学 568 名学生的问卷调查[J]. *中国组织工程研究*, 23(23): 3722-3728.
- 贾楠, 贾晓敏, 郝晶晶, 等, 2020. 基于多元热生理仿真的运动健康量化方法及系统实现[J]. *太原理工大学学报*, 51(3): 451-461.
- 鲁亚磊, 王瑞, 邢奕鹏, 等, 2018. 人体运动数据的实时采集及可靠传输系统设计[J]. *电子测量技术*, 41(6): 109-114.
- 曲鑫璐, 邓辉, 师云龙, 等, 2020. 着装人体局部热舒适性研究与发展现状[J]. *丝绸*, 57(12): 55-62.
- 孙滢, 2019. 基于微型建筑的服装热阻对人体热舒适的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学.
- 陶佳, 2021. 有氧运动联合科学营养指导对老年心衰患者疗效和患者运动情况及负性情绪的影响[J]. *当代医学*, 27(18): 40-42.
- 滕毅, 王若梅, 焦娇, 2021. 一种运动着装人体热生理仿真方法: CN202111549156.1[P]. 2021-12-17.
- 滕毅, 郑怡, 王若梅, 等, 2022. 《高性能服装 CAD 设计》教学模式探索[J/OL]. *科教导刊(电子版)*, (9): 150-152.
- 王秀荣, 2018. 普通高校体育运动风险防控的理论与实践[J]. *黑河学院学报*, 9(2): 112-113.
- 王正珍, 2020. 规律运动提升免疫力优化慢性病管理[J]. *中华健康管理学杂志*, 14(3): 221-225.
- 吴静, 2020. 高强度运动对大学生体质健康水平的影响[J]. *体育风尚*, (2): 11-12.
- 苑秀明, 2012. 浅析蒙古袍结构的“烟囱效应”[J]. *天津纺织科技*, (2): 37-38+41.
- 张崇林, 王世香, 王卉, 等, 2020. 基于关联规则数据挖掘的大学生体育锻炼行为阶段体质健康知识发现[J]. *井冈山大学学报(自然科学版)*, 41(3): 80-84.
- 张宪文, 黄锦康, 伍智琴, 等, 2020. 基于 Android 系统的一款运动健康类 APP 的设计[J]. *电子测试*, (11): 79-81.
- 赵蒙蒙, 柯莹, 王发明, 等, 2019. 通风服热舒适性研究现状与展望[J]. *纺织学报*, 40(3): 183-188.
- 朱光, 2009. 消防员着装系统的构成及其热湿舒适性研究[D]. 上海: 东华大学.
- ANGELOVA R A, 2015. Numerical simulation of the thermoregulation of clothed human body: Skin and clothing temperatures[J]. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 37(1): 297-303.
- AWAIS M, KRZYWINSKI S, WENDT E, 2018. Thermal simulation of human body-clothing-environment system[C]//12th In-

- ternational Manikin and Modelling Meeting, St. Gallen, Switzerland.
- FANGER P O, 1970. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering[M]. Copenhagen: Danish Technical Press.
- HOLOPAINEN R, 2012. A Human thermal model for improved thermal comfort[D]. Helsinki: Aalto University.
- JIA N, HUANG Y, LI J, et al, 2019. Parallel simulation model for heat and moisture transfer of clothed human body[J]. J Supercomput, 75(8): 4731–4749.
- LEE T G, LEE S H, 2016. Dynamic bio-sensing process design in mobile wellness information system for smart healthcare[J]. Wirel Pers Commun Int J, 86(1): 201–215.
- LI Q, CLIFFORD G D, 2012. Dynamic time warping and machine learning for signal quality assessment of pulsatile signals[J]. Physiol Meas, 33(9): 1491–1501.
- MAO A, LUO J, LI G, et al, 2016. Numerical simulation of multiscale heat and moisture transfer in the thermal smart clothing system[J]. Appl Math Model, 40(4): 3342–3364.
- MAO A, LUO J, LI Y, et al, 2011. A multi-disciplinary strategy for computer-aided clothing thermal engineering design[J]. Comput Aided Des, 43(12): 1854–1869.
- MAO A, LUO J, LI Y, 2017. Numerical simulation of thermal behaviors of a clothed human body with evaluation of indoor solar radiation[J]. Appl Therm Eng, 117: 629–643.
- STOLWIJK J A J, HARDY J D, 1966. Temperature regulation in man: A theoretical study[J]. Pflüger's Archiv für die gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 291: 29–162.
- TENG Y, JIAO J, WANG R, et al, 2022. Computational model of predicting thermal performance of a clothed human by considering the clothing pumping effect[J]. J Therm Sci Eng Appl, 14(1): 014501.
- WANG Z, LI Y, ZHU Q Y, et al, 2003. Radiation and conduction heat transfer coupled with liquid water transfer, moisture sorption, and condensation in porous polymer materials[J]. J Appl Polym Sci, 89(10): 2780–2790.

(责任编辑 冯兆永)