

暖体假人的发展与应用

朱凯颖¹, 刘何清^{1,*}, 米立华¹, 陈 芬¹, 吴世先^{1,2}, 吴国珊^{1,2}

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 桂林航天工业学院 能源与建筑环境学院, 广西 桂林 541000)

摘要:经过近百年的发展,暖体假人经历了由单段暖体假人向多段暖体假人、实体暖体假人向数值暖体假人、干态暖体假人向出汗暖体假人,再向可呼吸性暖体假人的发展历程。暖体假人应用则由最初的服装热阻测定扩展到环境及人体的热舒适性评价;最初的军事、航空航天领域扩展到建筑环境、大气环境以及极地、火灾等特殊或危险环境领域;最初的评价稳定环境下的人体热舒适性扩展到瞬态、非均匀环境下的人体热舒适性。未来假人必将向复杂化、智能化、高仿真化发展。

关键词:暖体假人;热阻;热舒适评价;环境;人体

中图分类号:TS941.17

文献标识码:A

文章编号:1673-0356(2019)03-0001-05

环境舒适度是影响生产效率、生活质量的重要因素。为研究环境的舒适度问题,国内外专家主要采用真人实验、问卷调查以及模拟实验的方法进行,其中模拟实验就包括使用模拟假人进行试验。

早在20世纪20年代,英国就制造了垂直的铜圆柱充当假人^[1]。早期的假人主要是用来测试服装热湿传递性能的,随着假人技术的发展,更多诸如航空航天、交通以及消防等领域开始使用假人进行试验^[2],其与真人试验相比,假人可以根据需要模拟任意温度下的人体状态,且可实现参数的稳定控制,不会受人的心理因素的影响,可用于极端或危险环境条件下。

假人历经百余年的发展,已经在各个领域发挥了作用。本文以暖体假人在热环境评价中的应用及发展为主线,阐述假人的发展过程以及应用,并根据目前科技发展的动向提出假人发展和应用的展望。

1 暖体假人的发展

1.1 国外的暖体假人

从暖体假人研究开始国内外已经制作了100多种实验用暖体假人^[3],按照暖体假人的用途可分为干态暖体假人、呼吸暖体假人、出汗暖体假人、数值暖体假人、浸水暖体假人等。其发展历程主要经历了三个阶段:第一个阶段是1941年基于美国学者 Gagge 及其研

究团队提出的“clo”即衣物热阻的概念,美国军需气候研究所研制出了第一代暖体假人,为单段暖体假人,只可以用来做静态服装热阻的测试^[4]。早期的暖体假人一般都为军队服务,后来扩展到其他各个领域,但目前暖体假人仍是试验军需品的重要工具;第二阶段的暖体假人为分段式暖体假人,诞生于20世纪60年代,相比单段暖体假人的优点在于其每段都可单独控制,独立加热,模拟人体一些简单的姿势,更真实地模拟人体体表温度状态^[5],可进行服装的静态以及动态热阻测定;第三代暖体假人为出汗暖体假人^[6-7],20世纪70年代由 Goldenman^[8]与 Mecheels^[9]教授等联合制作的。第三代暖体假人与前两代暖体假人相比,不仅可以真实模拟人体表皮温度,测量服装的静态和动态热阻,还能在微机和软件的控制下模拟人体出汗状况。基于人体出汗分为气态和液态,出汗暖体假人又分为有汗腺及无汗腺两类^[10]。出汗暖体假人的出现,使得定量评价服装的热学性能(湿阻以及隔热性能)成为可能,现今被广泛地用于特种服装(航空航天、消防等)的评价和人—服装—环境热交换的评价^[11]。

1.2 我国的暖体假人

我国暖体假人的理论研究和模型制作起步较晚,自20世纪70年代我国才开始重视暖体假人的研制,东华大学和总后勤部军需装备研究所是当时最早一批研究暖体假人的单位。

20世纪70年代,总后勤部军需装备研究所成功研制了恒温暖体假人,又在80年代研制了变温暖体假人,并广泛应用于各类特种服装^[12]的研制;90年代起

收稿日期:2019-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51474105,51864014)

作者简介:朱凯颖(1994-),男,在读硕士研究生,主要研究方向为人体热舒适及人与环境的热传递。

* 通信作者:刘何清, E-mail: hqliu8222638@163.com.

开始研究出汗暖体假人,并在2000年成功研制出汗暖体假人测试系统^[13]。湛玉红^[14]将中国与瑞典暖体假人进行了服装热阻测试对比,结果表明无显著差异,间接反映出我国在暖体假人研究领域已达到世界先进水平。

自20世纪80年代,被称为“暖体假人之父”的东华大学张渭源教授开始暖体假人研究,并将暖体假人成功应用到极地防寒服的研制上。1995年东华大学与航天所合作研制了暖体出汗假人,并成功应用于航天服的研制,这是我国第一个用于航天的暖体假人;2000年研究了暖体假人内部热损失,为利用暖体假人开展服装散热损失实验研究奠定了基础^[15]。此后,东华大学暖体假人团队先后研制成功了“神舟五号假人”、“神舟七号假人”,并以此进行了舱内及舱外航天服的制作研究^[16-17],同时还对简易假人体表电阻丝的敷设^[18]和假人表面软质模拟皮肤^[19]等进行了研究,为我国暖体假人的研究做出了贡献。

在暖体假人研究的基础上,2000年我国开始了数值暖体假人的研究。2013年王云仪和李俊等^[20]利用CFD软件建立了虚拟的人工气候实验室和数值人体,预测了躯干着装时衣下空气层内的温度分布,结果与真实情况具有一致性,说明了数值暖体假人能够准确预测人体—服装—环境的热量传递与交换。

2002年中国香港理工大学的范金土教授发明了全球第一个用特种织物制作的出汗暖体假人“Walter”,使出汗暖体假人得到跨越式发展。2007年王发明等^[21]利用“Walter”对服装热湿传递特性进行了检验,并与香港理工大学的测试结果进行了对比分析;常维娜等^[22]根据李盼等提出的出汗头模型完善了“Walter”头部出汗系统;李菲菲等^[23]依靠“Walter”测试了保暖服、防寒服、调温背心的热湿舒适性能。

2 暖体假人在环境评价中的应用

在暖体假人近百年的发展史中,国内外专家都做出了巨大贡献,目前暖体假人主要应用于服装热湿阻的测定和热环境评价。对服装热湿阻的测定是研发暖体假人的初衷,而对热环境的评价是近年来暖体假人的另一种应用,在评价环境热舒适中起到了重大的作用。暖体假人在热环境的应用主要有两个方面:一是评价处于热环境中的人的热舒适性和安全性,二是评价热环境的热舒适性及安全性。

2.1 国外应用状况

应用暖体假人对热环境进行评价最早是由Mihira等提出的。1977年,Mihira等开发了一种不仅能用来测试服装热湿阻,还能用来评估热环境的暖体假人,但没有明确界定热感觉和假人热损失之间的关系。1979年,Olesen,B.W.^[24]等招募了16名志愿者在存在温差的室内环境进行了真人试验,并与暖体假人试验结果相对照,取得了很好的一致性,证明了假人评价热环境的可行性。1980年英国的学者用暖体假人进行了人的主观感觉与热环境物理量的关系研究,发现主观感觉和当量温度 ET 有极高的相关性^[25],其总结当量温度 ET 计算公式为:

$$ET = 0.522t_a + 0.478t_{mrt} - 0.21\sqrt{v}(37.8 - t_a) \quad (1)$$

式中: t_a 为空气温度,℃; t_{mrt} 为环境平均辐射温度,℃; v 为空气速度,m/s。

但后续研究表明,其计算结果偏冷,而且由于不包含空气湿度,关系式只能用于温度25℃以下、风速在0.05~0.5 m/s范围内。1985年,提出PMV方程的Fanger博士^[26],在进行室内不对称热辐射舒适极限研究时,使用了假人进行对照试验,并建立了墙体和天花板的不对称辐射函数,确定了人体热舒适状态下墙体和天花板不对称辐射温度差极限。1989年,Wyon等^[27]使用“VOLTMAN”暖体假人对车辆中人体舒适度范围进行定义,并对人体和人体模型在车辆复杂热环境中的响应进行了比较,评估给定车辆是否满足特定操作条件下的人体要求,提出了等效均一温度EHT,为研究车辆内热环境的舒适性评估提供了新的方法,但是计算中忽视了暖体假人身下椅子的热阻,导致所得到的EHT偏大。

Tanabe教授^[28]等认为暖体假人可用于采暖、通风和空调(HVAC)系统形成的微气候的评估。1989年,提出用铝制暖体假人模型来评估热环境,1994年,又提出利用一种新型的暖体假人对非均匀热环境进行了测量,并提出了基于暖体假人的热环境等效温度(t_{eq})以及热损失表征人体热反应的评价指标PMV指数法。等效温度 t_{eq} 的计算式:

$$t_{eq} = t_s - 0.155(I_{cl} + I_a/f_{cl})Q_s \quad (2)$$

式中: t_{eq} 为基于暖体假人的等效温度,℃; t_s 为平均皮肤表面温度,℃; I_{cl} 为衣物基础热阻,clo; I_a 为单单位皮肤表面积的皮肤表面热阻,clo; f_{cl} 为服装面积系

数; Q_i 为皮肤表面的热量损失, W/m^2 。

暖体假人不仅可以用来评价热环境下的人体舒适度,也可以评价人对热环境的影响。由于人会通过传导、对流、辐射及蒸发散热的方式与室内环境进行热交换,并且人运动和呼吸会产生气流运动,这势必会影响热环境。2000年,奥尔堡大学的 Peter V. Nielsen 教授^[29]在室内环境测量中引入了暖体假人模型,对采用置换通风、混合通风以及局部通风的环境进行了实验研究,论证了不同通风方式下人体对室内环境的影响,并指出在有限的空间内,假人的几何形状以及散热量也会改变室内环境参数。虽然假人的几何形状以及散热量也会改变室内环境参数,但相对于真人具有散热量稳定,且可控的优点,在进行相同类型实验研究时建议使用暖体假人。

2001年,Charlie Huizenga^[30]基于25节段的 Stolwijk 人体热调节模型和数值暖体假人建立了新的数值分析模型——伯克利模型,该模型能够预测人体对瞬态、非均匀热环境的生理反应。应用此模型不仅可以评估暖通空调系统的热舒适性,还可以评估汽车乘员的热舒适性,相对以前的评估系统更精确。2003年,H. O. Nilsson^[31]等采用数值暖体假人评估不同环境对人的影响及人体的舒适度,此数值暖体假人还能帮助工程师在设计和施工中作出早期决策,提高劳动效率。

为评价室内空气质量,1996年 Brohus and Nielsen 发明了可呼吸暖体假人,更真实地模拟真人评价室内环境的舒适性及人对室内空气流动的影响;2004年 Arsen Melikov^[32]对可呼吸暖体假人的身体大小和形状、控制系统、呼吸模拟等进行了讨论与补充,指出可呼吸暖体假人存在不能模拟人类对瞬态环境的主观及生理反应。可呼吸暖体假人虽然可以评价室内热环境,但是由于人类个体差异的原因,依据假人建立的模型只能预测人的平均舒适度。2006年,K. W. D. Cheong^[33]采用暖体假人和真人对照试验,对置换通风系统室内环境人体的热舒适进行了研究,分析了室内热环境对整体和局部人体热感觉和热舒适的影响。

由国外环境评估暖体假人的发展可以看到,早期国外专家研究热环境及人体舒适度多采用实体假人模型,随着计算机技术的发展和理论研究的支撑,近现代专家开始采用数值暖体假人进行热环境的评估。

2.2 国内应用状况

我国暖体假人的研究起步较晚,相对应的,在热环

境、人体舒适性评价中的应用也较晚,但随着暖体假人技术的发展和近30年的应用研究,暖体假人在热环境和人体热舒适评价中的应用也越来越广泛,评价可靠性越来越高。

1991年,陶培德^[34]借鉴了国外采用数值暖体假人评价室内热环境的方法,构建了三维传热传湿数值计算模型,并进行了人—服装—环境的热湿交换相互验证试验,试验结果与国外数值暖体假人具有很好的一致性,为环境热舒适的评价提供了新的理论与方法;1993年,同济大学的徐文华^[35]使用暖体假人研究人与环境的热交换,与借助平板导热仪研究热传递的方法相比,暖体假人具有可动态模仿人体运动姿势的优点;1999年,叶海^[36]使用暖体假人进行对流、辐射换热与热舒适的关系研究,重点研究了强制对流换热系数及两种姿势(站姿、坐姿)下的有效辐射面积系数,提出了“热平衡准则数 HB”,给出了 PMV 与 HB 的关系。

2005年,叶海^[1]汇总了基于暖体假人的环境评价指标(ET、MMRT、EHT、EQT、WBGT),并与平均辐射温度 MRT 比较,从理论上证明用假人评价热环境更加真实可靠。张昭华^[37]则在2008年汇总了基于暖体假人制定的标准,包括国际标准、欧洲标准、美国标准等,并对几类评价热环境的假人进行了简单描述。

2012年,韩雪峰^[38]基于20分段暖体假人,使用 C 语言编程建立了新的数值传热模型,该数值传热模型可根据给定环境的温度变化,分析达到热平衡状态时暖体假人各部分的温度,并经过与20分段暖体假人的对比试验检验,在常温及高温范围内,此新的数值传热模型与实体假人模型的热传递误差很小;并在此数值传热模型基础上,提出了将人体生理主动调节机制引入该模型,用于高温环境中真实人体的生理反应仿真,快速预测人员的安全性。随后,张超^[39]于2014年建立了一种评价高温环境人体安全的方法,并应用 NEWTON 假人对真人人体体表升温、出汗状态进行模拟,从体温、出汗量两个角度对人体安全性进行判断,为高温环境人体安全防护作出预判。

2017年赵朝义^[40]发明了一种用于评价室内环境舒适性的假人系统和评价方法,该方法采用16分段的暖体假人对室内环境参数进行采集,结合人体代谢率与人体热感觉的关系,对室内环境进行评价,指导室内环境设计。在此16分段假人基础上,王瑞^[41]对室内环境预计平均热感觉指数 PMV 进行测试,并与真人试

验得出的结果进行了对比,验证了假人模型评价室内热环境舒适性具有很好的准确性。

3 结论与展望

(1)自从上世纪20年代英国制造的垂直铜圆柱“假人”起,便开启了假人研究与应用的征程,经过近百年的发展,暖体假人经历了由单段暖体假人向多段暖体假人、实体暖体假人向数值暖体假人、干态暖体假人向出汗暖体假人、再向可呼吸性暖体假人的发展历程。模拟技术及精度越来越高,越来越逼近真人的代谢、调控及散热机制,为科学、准确评价人体、环境的热舒适性提供了先进的工具。虽然国内暖体假人研究起步较晚,但是,现今已经达到世界先进水平。

(2)在暖体假人应用方面,由最初的服装热阻测定扩展到环境及人体的热舒适性评价;由最初的军事、航天航空领域扩展到建筑环境、大气环境以及极地、火灾等特殊或危险环境领域;由最初的评价稳定环境下的人体热舒适性扩展到瞬态、非均匀环境下的人体热舒适性。特别是数值暖体假人的应用,使新材料服装热阻、新环境领域的热舒适性及安全性的预测成为可能。

(3)根据假人的发展历程及应用领域,未来假人的发展有4种趋势:一是简单化,二是复杂化,三是智能化,四是仿真化。而在环境评价和人体舒适度评价领域,假人模型应以数值暖体假人为主,并朝着复杂化、智能化、高仿真化的方向发展。虽然目前已经研究出了出汗暖体假人和可呼吸暖体假人,并且其功能越来越仿真,但是,目前的假人,不管是实体假人还是数值暖体假人都无法准确反应人体的各项生理参数,特别是瞬态变化环境中人体的生理反应参数。我们相信,随着科学的飞速发展,高智能化、高仿真的假人一定能够变为现实。

参考文献:

- [1] 叶海,魏润柏.基于暖体假人的热环境评价指标[J].人类工效学,2005,11(2):26-28.
- [2] 黄建华.国内外暖体假人的研究现状[J].建筑热能通风空调,2006,25(6):24-29.
- [3] HOLMER I. Thermal manikin history and applications [J]. European Journal of Applied Physiology, 2004, 92(6):614-618.
- [4] WISSLER E H. Steady-state temperature distribution in man[J]. Journal of Applied Physiology, 1961, 16(16):734-740.
- [5] 陈佳佳.暖体假人的研究与制作[D].上海:东华大学,2015.
- [6] 王欢,马崇启,吕汉明.出汗暖体假人的研究现状与发展方向[J].产业用纺织品,2017,35(10):1-7.
- [7] 雷中祥,钱晓明.出汗暖体假人的研究现状与发展趋势[J].丝绸,2015,52(9):32-36.
- [8] GOLDMAN R F. Tolerance time for work in the heat when wearing cbr protective clothing[J]. Military Medicine, 1963, 128:776.
- [9] MECHEELS J, UMBACH K H. The textile and clothing-physiological requirements to be met by therapeutic thermal segments[J]. Schriftenr Zentralbl Arbeitsmed Arbeitsschutz Prophyl Ergonomie, 1981, 6:205-211.
- [10] 李书政.简体暖体假人的研制[D].上海:东华大学,2014.
- [11] 陈浏.暖体出汗假人的开发现状及其研究方向[J].纺织科技进展,2009,(2):87-89.
- [12] 朱秉臣,曹俊周.特种功能服装的研制和开发[J].产业用纺织品,1989,(6):19-24.
- [13] 谌玉红,姜志华,倪济云,等.出汗假人及其应用[J].天津工业大学学报,2004,23(5):102-104.
- [14] 谌玉红,姜志华.中国一瑞典暖体假人测试服装热阻的比较试验[J].中国个体防护装备,2001,(3):4-7.
- [15] 朱利军,张渭源,卫兵.暖体假人内部热损失率的试验研究[J].中国纺织大学学报,2000,26(2):14-16.
- [16] 向娟.东华大学仿生假人研究团队持续攻关,提升我国功能服装防护水平[J].上海教育,2011,(21):64-64.
- [17] 边吉.东华大学高科技成果在神舟七号上应用[J].产业用纺织品,2008,26(10):47-48.
- [18] 罗雪钢,邹钺,刘赟,等.暖体假人表面电热丝的敷设方案论证[J].建筑热能通风空调,2016,35(11):92-94+101.
- [19] 杨凯,焦明立,陈益松,等.暖体假人软质模拟皮肤的研究及其应用[J].纺织学报,2008,29(12):74-77.
- [20] WANG Y Y, HUANG Z W, LU Y H, et al. Heat transfer properties of the numerical human body simulated from the thermal manikin[J]. Journal of the Textile Institute Proceedings and Abstracts, 2013,104(2):10.
- [21] 王发明,胡锋,周小红,等.“Walter”暖体假人测试服装的热湿传递特性[J].现代纺织技术,2007,15(6):32-34.
- [22] 常维娜.基于出汗头的帽子热湿舒适性的测量研究[D].上海:东华大学,2010.
- [23] 李菲菲.基于出汗暖体假人服装热湿舒适性能研究[D].杭州:浙江理工大学,2014.

- [24] OLESEN B W, SCHOLER M, FANGER P O. Discomfort caused by vertical air temperature differences[J]. *Indoor Climate*, 1979, 36: 561—578.
- [25] HOPPE P R. Indoor climate[J]. *Experientia*, 1993, 49(9):775.
- [26] FANGER P O, IPSEN B M, LANGKILDE G, *et al.* Comfort limits for asymmetric thermal radiation[J]. *Energy & Buildings*, 1985, 8(3):225—236.
- [27] WYON D P, LARSSON S, FORSGREN B, *et al.* Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin[C]// *Subzero Engineering Conditions Conference & Exposition*, 1989.
- [28] TANABE S, ARENS E A, BAUMAN F, *et al.* Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature [J]. *Ashrae Transactions*, 1994, 100(1):39—48.
- [29] NIELSEN P V. The importance of a thermal manikin as source and obstacle in full-scale experiments[C]// *Proceedings of the 3rd international meeting on thermal manikin testing*, 1999.
- [30] HUIZENGA C, HUI Z, ARENS E A. model of human physiology and comfort for assessing complex thermal environments[J]. *Building & Environment*, 2001, 36(6): 691—699.
- [31] NILSSON H O, HOLMER I. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models.[J]. *Indoor Air*, 2010, 13(1):28—37.
- [32] MELIKOV A. Breathing thermal manikins for indoor environment assessment: important characteristics and requirements[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2004, 92(6):710—713.
- [33] CHEONG K W D, YU W J, KOSONEN R, *et al.* Assessment of thermal environment using a thermal manikin in a field environment chamber served by displacement ventilation system[J]. *Building & Environment*, 2006, 41(12):1 661—1 670.
- [34] 陶培德. 人体与环境的热湿交换研究及数学模拟[J]. *制冷学报*, 1991,(1):26—32.
- [35] 徐文华. 暖体假人在人与热环境研究中的应用[C]// *中国系统工程学会.第一届全国人一机—环境系统工程学术会议论文集*, 1993:4.
- [36] 叶海. 人体的对流辐射换热与热舒适[D]. 上海:同济大学, 1999.
- [37] 张昭华. 热湿舒适性研究中暖体假人的应用[J]. *中国个体防护装备*, 2008,(1):23—25.
- [38] 韩雪峰, 翁文国, 付明. 高温环境中发汗暖体假人的热生理数值模型[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2012,52(04):536—539.
- [39] 张超, 秦挺鑫, 吴甦, 等. 基于暖体假人的热环境下人体安全评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2014,54(02):264—269.
- [40] 赵朝义, 呼慧敏, 邱义芬, 等. 室内热环境舒适性评价用暖体假人系统及其评价方法:中国, 201710312899.4[P]. 2017—08—08.
- [41] 王瑞, 赵朝义, 呼慧敏, 等. 基于暖体假人的环境热舒适评价技术研究[J]. *人类工效学*, 2018,24(2):43—47.

Development and Application of Thermal Manikin

ZHU Kai-ying¹, LIU He-qing^{1,*}, MI Li-hua¹, CHEN Fen¹, WU Shi-xian^{1,2}, WU Guo-shan^{1,2}

(1. College of Resources, Environment and Safety Engineering,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Department of Energy and Building Environment, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: After nearly a hundred years of development, thermal manikin had experienced from single segment to multi-segment, solid to numerical, dry to sweating and breathable. The application of thermal manikin extended from the initial clothing thermal resistance measurement to the thermal comfort evaluation of environment and human body. The initial military and aerospace fields extended to the building environment, atmospheric environment and special or dangerous environment such as polar and fire. The initial thermal comfort evaluation of human body in stable environment extended to the thermal comfort evaluation of human body in transient and non-uniform environment. In the future, manikin would develop towards complexity, intelligence and high simulation.

Key words: thermal manikin; thermal resistance; thermal comfort evaluation; environment; human body