

新型出汗假人“Walter”与“一步法”测量原理^①

陈益松¹, 范金土², 张渭源¹

(1. 东华大学服装学院, 上海, 200051; 2. 香港理工大学纺织服装系, 香港九龙)

摘要 新型假人“Walter”是一个用水和特种织物设计制造的出汗暖体假人系统,其内部采用水循环系统模拟人体的血液循环系统来实现人体的发热和温度分布特性,采用微孔膜复合织物模拟皮肤来实现人体皮肤的出汗特征。因其具有独特的结构和工作原理,实现了无任何假设条件的“一步法”测量方式来测量服装的两大热舒适性指标:热阻和湿阻。实验证明该系统设计是成功的,工作是可靠的。

关键词: 暖体假人, 人体出汗, 服装热舒适性

中图分类号: TS 101.923

1 服装热舒适性与暖体假人

在现代社会中,服装不仅是身体美丽的装束,更重要的是保持身体的舒适性。服装的舒适性包含许多方面,诸如接触舒适性、运动舒适性及热舒适性等,在所有服装的舒适性的内涵中,以热舒适性最为重要,这是因为服装需要在各种乃至极限环境下保持身体的正常的热生理状态。因此,正确估计和评价服装的热舒适性指标对服装设计者和使用者而言都有重要的意义。

人体散热方式主要有显热(干热)和潜热(蒸发散热)两种方式,因此,影响服装热舒适性的指标主要是服装的透热性能(热阻)和服装的透湿性能(湿阻)。分别以下列方程表示:

$$H = H_d + H_e \quad (1)$$

$$H_e = E \cdot G_e \quad (2)$$

$$R_d = \frac{A \cdot (t_s - t_a)}{H_d} \quad (3)$$

$$R_e = \frac{A \cdot (p_s - p_a)}{H_e} = \frac{A \cdot (p_{st} \cdot RH_s - p_{at} \cdot RH_a)}{E \cdot G_e} \quad (4)$$

其中: R_d 是服装及其附面层空气的热阻($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{W}$); R_e 是服装及其附面层空气的湿阻($\text{Pa} \cdot \text{m}^2/\text{W}$); A 是人体的体表面积(m^2); t_s 是假人皮肤的温度($^{\circ}\text{C}$); t_a 是环境温度($^{\circ}\text{C}$); p_s 是人体皮

肤表面的水蒸汽压(Pa); p_a 是环境的蒸汽压(Pa); p_{st} 是温度 t_s 下人体皮肤表面的饱和水蒸汽压(Pa); p_{at} 是温度 t_a 下环境的饱和蒸汽压(Pa); RH_s 是人体皮肤表面的相对湿度(%); RH_a 是环境的相对湿度(%); E 是水的汽化热, 35°C 时 E 是 $0.672 \text{ W} \cdot \text{h/g}$; G_e 是假人的蒸发出汗量(g/h); H 是假人的总散热量(W); H_d 是假人的干散热量(W); H_e 是假人的蒸发散热量(W)。

假人模拟人体出汗的目的是要测量服装的透湿指标,根据公式(1)~(4),要得到服装的透湿指标,首先需要检测出公式中所有的变量,然而出汗皮肤表面空气层的水汽压或相对湿度和通过服装及其开口部分的水汽蒸发量或蒸发散热量这两个参数较难直接检测,很多情况下需要通过间接方式求得。

世界上最早出现的干态暖体假人^[1]只能测量服装的热阻而不能测量服装的湿阻。而最早研制的“出汗”暖体假人是在干态假人身上外挂高保湿棉织物来模拟出汗皮肤,“汗”是由喷水器喷上去的,这样的“汗水”在“皮肤”表面不能持久保持,因而实验也会受到很大限制^[2,3]。后来改进研制的出汗假人,基本结构都是通过供水系统由管路将水通入“皮肤”,这样可使“皮肤”持久保持水分。相对简单的是由外部管路直接通入皮肤^[4];复杂的是由假人内部管路系统通入体表皮肤的^[5,9]。这一类出汗假人基本由传统的硬壳结构加上“出汗”系统构成,其基本组成如图1所示。

①收稿日期: 2005-01-11

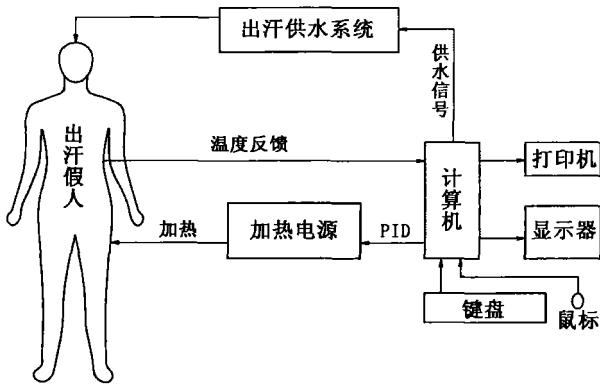


图 1 出汗假人的基本组成

2 传统“两步测量法”及两个假设

对于假人出汗的模拟情况, 一种是完全模拟人体出汗的情况, 包括各种环境下及人体剧烈运动时的大汗淋漓的情况, 然而大多数真人出汗的情况并不能满足假人作为仪器测量服装热湿指标的要求, 例如大汗时汗滴沿下肢滴下时的这部分水量将不能作为水汽通过服装及其开口部分来计算服装的透湿能力, 同时, 液态汗水浸入服装将严重影响服装的隔热透湿能力。所以, 作为测量服装热湿特性的仪器而言, 出汗的模拟理想的是第二种情况, 即, 全身均匀释出气态汗。这样通过检测皮肤表面与服装外环境的湿气压以及出汗量就可方便地计算出服装的湿阻或透湿指数。

然而, 在绝大多数情况下, 皮肤与服装间的湿气压或相对湿度都很难精确测量, 这与皮肤与服装之间的微环境以及传感器的工作原理有关。在过去很多实验中, 研究者都倾向于将皮肤的相对湿度假定为 100%^[2-4], 即假人“皮肤”含有液态水, 而又无大量水滴渗或直接浸入服装, 这是一种理想状态。然而, 因为出汗假人的供水系统各不相同, 这种理想状态很少存在。相对湿度为 100% 的假设与实际情况的误差有多大, 一直没有实验数据来说明。

在使用外挂出汗“皮肤”的情况下, 通过服装及其开口部分的水汽量或者说蒸发热是不能直接测定的, 因此, 在过去一直沿用 McCullough^[3] 等所采用的“两步法”来测量服装的透湿指标, 即首先使用干态假人来测量服装的干透热功率, 然后, 再让假人“出汗”, 服装再穿着于湿态假人上来测量总的散热功率(包括蒸发散热部分), 最后用湿假人的总散热功率来减去干假人的散热功率即为蒸发散热部分。算法如下:

$$H_e = H - H_d \tag{5}$$

$$R_e = \frac{A \cdot (p_{af} \cdot RH_s - p_{af} \cdot RH_a)}{H - H_d} \tag{6}$$

这里有一个潜在的假设就是服装穿在干假人上测得的干态透热功率与服装穿在湿态(出汗状态)假人身上的干透热功率相等, 但是, 实验证明, 服装在湿假人身上因为水汽通过而吸湿的原因, 其热阻将降低, 所透过的干功率也将比服装在干态假人上所透过的干功率有所增加, 所以, 在不同的状态下服装所测得的干功率是不同的。在两者简单划等号的情况下, 必然造成测量结果的误差。因此, 由上述方法所测得的服装湿阻将比实际值要大, 其误差值的大小与服装面料特性及其吸湿量的多少有关^[7]。

3 出汗假人“Walter”与“一步法”测量原理

新型出汗假人“Walter”^[8] 的工作原理是用微孔膜织物将整个水循环系统包含其中, 水循环系统模拟人体的血液循环系统把躯干部分中心区域加热的水按一定比例分配给头和四肢, 以模拟人体的整个温度分布; 整个假人的皮肤由含有微孔结构的 PTFE 膜的 Gore-Tex 织物制成, 其膜的最大孔径小于 0.2 μm, 水蒸汽的分子的直径为 2.72 × 10⁻⁸ cm, 小于膜孔直径几百倍, 而液态水的最小水滴也要大于膜孔几万倍^[9]。所以, 可以让水气分子出来而不会让液态水流出。同时实验证明, 假人顶部与下部的水压差对假人上下部分的出汗量影响不大。

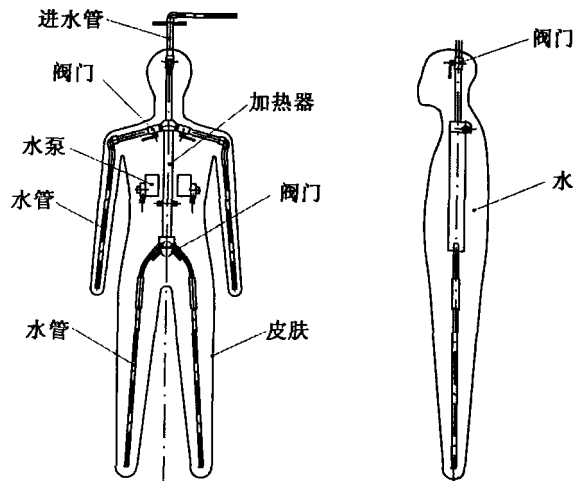


图 2 出汗假人“Walter”原理示意图

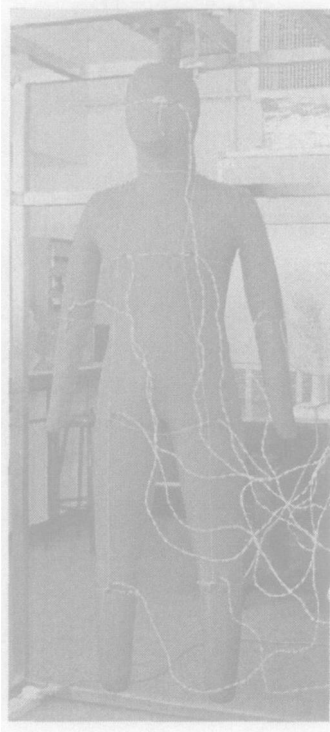


图 3 出汗假人“Walter”

“Walter”所选用的“皮肤”可以满足产生高气态汗、同时又没有汗水沿四肢滴下的要求,在开始的情况下,有湿汗汽凝结在服装内部,但当达到平衡后,即汗汽全部通过服装及其开口部位散失到环境空气中,这也是我们所需要的。需要指出的是,“Walter”的出汗方式是被动出汗方式,相对于主动出汗方式(Coppelius^[5], SAM^[6]都是主动控制的出汗方式,出汗量由人为设定并精确控制,在出汗量设定的条件下,不随服装的变化而改变),其出汗量是随服装透湿特性的不同而自动改变的,这恰好使假人皮肤内侧水界面到环境的相对湿度在假人皮肤和服装的参与下形成一个自然的变化梯度,同时“Walter”的出汗量在保持一定水位的情况下等于定时向假人补充的水量,是可以直接测量的,则透过服装的蒸发热可以根据式(2)直接加以计算。如果要精确测量服装的湿阻等服装的透湿指标,还需要精确测定皮肤与服装之间的湿气压或相对湿度,然而,实测证明这是非常困难的;使用 100% 的假设也同样缺乏精确性。在此,“Walter”因具有独特的工作原理,可使用下列方式计算:即把皮肤当作服装的一层,使用皮肤内侧的水气压来计算,因为皮肤内侧与体内的水直接相接触,则皮肤内表面的水汽相对湿度一定为 100%,然后,再减去皮肤的湿阻即为服装与其附面空气层的湿阻。即:

$$R_e = \frac{A \cdot (p_{is} - p_a)}{H_e} - R_{es} = \frac{A \cdot (p_{isf} - p_{af} \cdot RH_a)}{E \cdot G_e} - R_{es} \quad (7)$$

皮肤的湿阻(R_{es})可以通过对裸体假人吹强风去除表面附面空气层得到:

$$R_{es} = \frac{A \cdot (p_{isf} - p_{af} \cdot RH_a)}{E \cdot G_e} \quad (8)$$

相应地,服装及其附面空气层的热阻(R_d)为:

$$R_d = \frac{A \cdot (t_s - t_a)}{H_d} = \frac{A \cdot (t_s - t_a)}{H - E \cdot G_e} \quad (9)$$

其中, p_{is} 是假人皮肤内侧的蒸汽压; p_{isf} 是温度 t_s 下假人皮肤内侧的饱和蒸汽压。

4 实验结果

依据前述服装热阻和湿阻的“一步法”测量原理,我们设计了一组实验来测试“Walter”的性能。实验是在空间为 $5.5 \text{ m} \times 4.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ 的房间,温度为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,相对湿度 RH 为 $(65 \pm 3)\%$,风速为 $(0.5 \pm 0.3) \text{ m/s}$ 的恒定环境下进行的。实验按如下要求进行:(1)服装穿于“Walter”身上,待 12 h 服装含湿量稳定后开始测试;(2)“Walter”的躯干核心温度设定在 37°C ,控制精度达到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内开始记录数据;(3)每 50 s 自动记录一次数据,每一次记录又是连续 50 次采样的平均值。实验的服装及其组合见表 1,实验测试结果见表 2。

表 1 实验的服装及组合

服装代码	质量/g	服装及组合描述
A	248	长袖薄针织套装
B	806	长袖厚针织套装
C	1 185	棉夹克和长裤
D	900	Gore-Tex 防风夹克和长裤
E	1 054	A + B
F	1 433	A + C
G	1 148	A + D
H	2 239	A + B + C
I	1 954	A + B + D
J	365	三明治结构的保暖针织内衣套装; M
K	801	三明治结构的保暖针织内衣套装两层; M + XL
L	1 187	三明治结构的保暖针织内衣套装三层; M + L + XL

表 2 不同的服装及其组合的测试结果

服装代码	H/W	$G_e /$ ($g \cdot h^{-1}$)	$R_d / (^\circ C \cdot$ $m^2 \cdot W^{-1})$	$R_e / (Pa \cdot$ $m^2 \cdot W^{-1})$
裸体	802.6	721.0	0.065	11.8
A	484.6	428.0	0.105	20.7
B	457.1	400.0	0.105	20.6
C	350.0	295.0	0.147	31.8
D	375.0	310.0	0.134	30.0
E	389.7	340.0	0.139	26.7
F	319.5	262.0	0.168	37.5
G	337.3	272.0	0.154	36.4
H	289.4	241.0	0.186	41.5
I	291.3	240.0	0.181	40.2
J	491.8	454.0	0.119	23.5
K	366.7	343.8	0.178	34.1
L	312.1	290.0	0.196	38.0

实验结果证明, 该出汗假人系统在无假设条件下一次可完成总散热功率 H 、透汗量 G_e 及服装的热阻 R_d 和湿阻 R_e 的测量, 测量结果是可靠的。

5 结论与展望

暖体出汗假人系统是研究服装热舒适的重要设备, 它的研究开发与推广应用有重要的现实意义。全新结构的出汗假人“Walter”以其完全与众不同的被动式出汗方式, 在测量原理上第一次实现了无任何假设条件的“一步法”测量方式, 彻底摆脱了过去服装热湿指标测量中一直沿用的需要两个假设条件的“两步法”测量方式, 可以得到更加准确

的实验结果。实验证明该出汗假人系统设计是成功的, 运行是可靠的。

参 考 文 献

- [1] Holmer I. Thermal manikin in research and standards. Proceedings of the third International Meeting on Thermal Manikins. 3IMM, NIWL, Sweden, 1999
- [2] Mecheels J, Umbach K H. Thermo physiological properties of clothing system. Melland Textilberichte, 1977, 57: 1029-1032
- [3] McCullough E A, Jones B W, Tamura T. A data base for determining the evaporative resistance of clothing. ASHRAE Transaction, part2, 1989, 95: 316-328
- [4] Zhang W Y, Zhu L J. Study on the thermal sweating manikin. Proceedings of the Fourth International Meeting on Thermal Manikins. 4IMM, EMPA, Switzerland, 2001
- [5] Meinander H. Evaluation of functional clothing systems with a sweating thermal manikin. VTT SYMPOSIUM 133, Textiles and Composites 92, Finland, 1992: 289-295
- [6] Richards M G M. Development of a sweating agile thermal manikin. Proceedings of the Fourth International Meeting on Thermal Manikins. 4IMM, EMPA, Switzerland, 2001
- [7] Chen Y S, Fan J, Zhang W. Clothing thermal insulation during sweating. Textile Research Journal, 2003, 73(2): 152-157
- [8] Fan J, Chen Y S. Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour permeability using a novel perspiring fabric thermal manikin. Measurement Science and Technology, 2002, 13(7): 1115-1123
- [9] Tanner J C. Breathability, comfort and gore tex Laminates. Journal of Coated Fabrics, 1979, 8: 312-322

The Novel Perspiring Manikin “Walter” and “One Step” Measurement Method

CHEN Yi song¹, FAN Jin tu², ZHANG Wei yuan¹

(1. College of Fashion, Donghua University, Shanghai, 200051; 2. ITC Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

Abstract The novel manikin “Walter” developed is a perspiring manikin firstly made of water and breathable fabric. It has water circulation system inside to distribute heat to body and simulate perspiration with its skin made of PTFE laminate. Owing to its exclusive structure and principle, one step measurement method was realized for thermal insulation and evaporative resistance without any assumptions in two step method used before. Base on the experimental results, the development of the novel perspiring fabric manikin was successful and reliable.

Keywords: manikin, perspiring, thermal comfort